



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV GEOTECHNIKY**

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

**VYUŽITÍ ROZPTÝLENÉ VÝZTUŽE PRO ZLEPŠENÍ  
MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ ZEMIN**

APPLICATION OF FIBER REINFORCEMENT TO IMPROVE SOIL MECHANICAL PROPERTIES

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Daniela Šindelářová

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. JURAJ CHALMOVSKÝ, Ph.D.

**BRNO 2020**





## VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav geotechniky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Daniela Šindelářová
<b>Název</b>	Využití rozptýlené výztuže pro zlepšení mechanických vlastností zemin
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	30. 11. 2019
<b>Datum odevzdání</b>	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

---

doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

- GRAY, D. H., OHASHI, H. Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, vol. 109, no. 3, p. 335–353.
- LI, Ch., ZORNBERG, J. G. Mobilization of Reinforcement Forces in Fiber-Reinforced Soil. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, vol. 139, no. 1, p. 107–115.
- MAHER, M. H., GRAY, D. H. Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, vol. 116, no. 11, p. 1661–1677.
- MICHALOWSKI, R. L., ČERMÁK, J. Triaxial Compression of Sand Reinforced with Fibers. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, vol. 129, no. 2, p. 125–136.
- SANTONI, R. L., TINGLE, L. S., WEBSTER, S. L. Engineering properties of sand-fiber mixtures for road construction. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, vol. 127, no. 3, p. 258–268.
- ZORNBERG, J. G. Discrete framework for limit equilibrium analysis of fibre-reinforced soil. Geotechnique, 2002, vol. 52, no. 8, p. 593–604.

Další podklady budou předány na základě konzultací v průběhu samotného řešení bakalářské práce.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Předmětem bakalářské práce je sumarizace dostupných znalostí o zlepšování zemin rozptýlenou výztuží. Bakalářská práce je předběžně rozdělena do následujících částí:

- geomechanické chování zlepšené zeminy, vliv zlepšení na její inženýrské vlastnosti,
- používané typy, geometrie, materiály a podíly rozptýlené výztuže v zemině,
- metody zkoušení a jejich specifika ve srovnání se zkoušením nezlepšených zemin,
- způsoby výpočtu a navrhování, dostupné materiálové modely,
- příklady praktických aplikací.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

---

Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce byla sumarizace dostupných informací o zemině vyztužené rozptýlenými vlákny. V minulosti bylo po celém světě provedeno velké množství studií zabývajících se tímto tématem. Práce srovnává přístup jednotlivých řešitelů k tomuto problému co se týče vlastností výztuže – její materiál, rozměry a podíl v zemině. Všechny tyto parametry se ukázaly velmi různorodé, zatímco některé zdroje hovoří o vláknech malých rozměrů, jiné naopak o velkých rozměrech. Nejčastěji používaným materiálem se ukázal polypropylen, ačkoliv nebyl zdaleka jediným. Lze hovořit o různých přírodních, syntetických a dokonce i odpadních, jinak nevyužitelných, materiálech. Podíl vláken v zemině je v dostupných pracích uváděn několika způsoby, zde jsou tyto způsoby zhodnoceny a porovnány. Na zemině vyztužené rozptýlenými vlákny je také nutné provádět laboratorní zkoušky pro zjištění vlivu výztuže na inženýrské chování zeminy. Tyto zkoušky se ovšem od zkoušení nevyztužených zemin v některých parametrech liší, proto je na rozdíl upozorněno. Dále jsou shrnuty přístupy konkrétních řešitelů k testování. Z prováděných laboratorních zkoušek lze uvést triaxiální smykovou zkoušku, smykovou krabicovou zkoušku a pro zeminu vyztuženou vlákny specifickou zkoušku vytržení výztuže. V závěru jsou uvedeny a zhodnoceny materiálové modely dostupné pro navrhování zeminy vyztužené vlákny.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Zemina vyztužená vlákny, mechanika zemin, triaxiální smyková zkouška, smyková krabicová zkouška, zkouška vytržení vláken, materiálový model.

## ABSTRACT

The goal of this thesis was the summarization of available information about Fiber-reinforced soil. In the past, many of the previous works were published around the world. This thesis compares what type of fibres are in previous studies used – especially material, their size and amount in the Fiber-reinforced soil. All of these parameters were quite various, some of the sources used small-sized fibres, some used large-sized fibres. The most common material was polypropylene, although it was not the only one. For example, natural fibres, other synthetic materials, and waste materials can be mentioned. The amount of the fibres in the soil is measured in a few different ways, so in this thesis are these ways compared. It is necessary to run laboratory tests to quantify the effect of the fibres on the mechanical engineering properties of the soil. These tests are quite different compared to tests run on the unreinforced soil, so these differences are mentioned. The ways, how Fiber-reinforced soil was tested in different studies, are compared. From laboratory tests can be mentioned triaxial shear test, direct shear test and for Fiber-reinforced soil typical pullout test. At the end of this thesis are said and compared material models available for Fiber-reinforced soil design.

## KEYWORDS

Fiber-reinforced soil, soil mechanics, triaxial shear test, direct shear test, pullout test, material model.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Daniela Šindelářová Využití rozptýlené výztuže pro zlepšení mechanických vlastností zemin. Brno, 2020. 92 s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí práce Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Využití rozptýlené výztuže pro zlepšení mechanických vlastností zemin* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 22. 5. 2020

---

Daniela Šindelářová

autor práce

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Využití rozptýlené výztuže pro zlepšení mechanických vlastností zemin* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 22. 5. 2020

---

Daniela Šindelářová  
autor práce



# **OBSAH**

1	Úvod.....	12
2	Mechanické chování zeminy s rozptýlenými vlákny .....	15
2.1	Složení zeminy vyztužené rozptýlenými vlákny .....	15
2.2	Chování kompozitu.....	16
2.3	Definice ekvivalentních parametrů vyztužené zeminy .....	18
2.3.1	Porušení vytržením výztuže ze zeminy.....	19
2.3.2	Porušení přetržením výztuže.....	20
2.3.3	Zhodnocení způsobu výpočtu ekvivalentních parametrů .....	21
2.3.4	Predikce ekvivalentních smykových parametrů.....	21
3	Parametry výztuže .....	23
3.1	Materiál výztuže .....	23
3.1.1	Přírodní vlákna .....	23
3.1.2	Syntetická vlákna.....	24
3.1.3	Odpadní materiály.....	26
3.2	Geometrie rozptýlené výztuže .....	28
3.2.1	Délka vláken .....	28
3.2.2	Průměr vláken .....	29
3.3	Konkrétní příklady kombinací materiálu a rozměrů v různých podkladech .....	31
3.4	Povrchová úprava vláken .....	32
3.5	Podíl/koncentrace vláken.....	33

3.5.1	Objemový podíl .....	33
3.5.2	Hmotnostní poměr .....	33
3.5.3	Porovnání objemového a hmotnostního poměru .....	34
3.5.4	Plošný podíl vláken .....	36
3.5.5	Vliv množství vláken na zlepšení vlastností .....	37
3.6	Vliv orientace vláken .....	37
4	Metody zkoušení zeminy vyztužené vlákny .....	39
4.1	Specifika zkoušení vyztužené zeminy .....	39
4.1.1	Srovnání výsledků zkoušek s nevyztuženou zeminou .....	39
4.1.2	Příprava laboratorních vzorků .....	39
4.1.3	Rozměry těles .....	40
4.1.4	Typy zkoušek prováděných na vyztužené zemině .....	40
4.2	Triaxiální smyková zkouška .....	41
4.2.1	Obecně o triaxiální smykové zkoušce .....	41
4.2.2	Triaxiální zkoušky na vyztužené a nevyztužené zemině .....	43
4.2.3	Triaxiální zkoušky v předchozích studiích .....	44
4.2.4	Vliv vyztužení na výsledky triaxiální smykové zkoušky v předchozích studiích ...	51
4.3	Translační krabicová smyková zkouška .....	56
4.3.1	Obecně o přímé smykové zkoušce .....	56
4.3.2	Přímá smyková zkouška na vyztužené a nevyztužené zemině .....	58
4.3.3	Přímé smykové zkoušky v předchozích studiích .....	59

4.3.4	Vliv vyztužení na výsledky smykových zkoušek v předchozích studiích.....	61
4.4	Zkouška vytržení vláken .....	65
4.4.1	Obecně o zkoušce vytržení vláken .....	65
4.4.2	Zkouška vytržení vláken v předchozích studiích.....	65
4.4.3	Vliv typu vlákna na výsledky zkoušky vytržení výztuže v předchozích studiích ..	66
5	Materiálové modely zeminy vyztužené rozptýlenými vlákny .....	71
5.1	Waldron (1977) .....	71
5.2	Gray a Ohashi (1983) – GO model.....	72
5.3	Maher a Gray (1990) – MG model .....	74
5.4	Ranjan, Vasan a Charan (1996) – RVC model.....	76
5.5	Zornberg (2002).....	77
5.6	Shukla, Sivakugan a Singh (2010) – SSS model.....	77
6	Závěr.....	84
7	Zdroje .....	85
8	Seznam obrázků .....	89
9	Seznam tabulek .....	91

# 1 ÚVOD

Zemina vyztužená vlákny je v dnešní době jedním z možných způsobů, jak zlepšit inženýrské vlastnosti zemin. Tato myšlenka, stejně jako mnoho jiných objevů napříč různými obory, vzešla z pozorování přírody. V každodenním životě si můžeme všimnout, že kořeny vegetace (z našeho pohledu se jedná o přírodní vlákna) stabilizují povrch zeminy s nízkou smykovou pevností. Takováto přírodní vlákna ve formě například kořenů stromů zlepšují pevnost zeminy a s tím související stabilitu základů a svahů. Příkladem může být hráz rybníku lemovaná stromy, které svým kořenovým systémem ztužují a zpevňují zemní těleso hráze. Toto přírodní vyztužení zeminy však není trvalé vzhledem k omezené životnosti rostlin a stromů. Po pokácení stromů dochází k postupnému rozkládání přítomných kořenů, které po určité době přestanou dostatečně ztužovat prostředí, ve kterém se nacházejí, a hrozí kolaps celého zemního tělesa, ať už se jedná o již zmíněnou hráz nebo nestabilní svah. V 60. a 70. letech se tématu zpevnění svahu kořeny stromů zabývaly tři studie – Burroughs a Thomas (1977), Endo a Tsurata (1969), Waldron (1977).

Odtud vzešel nápad dodat do zeminy určité množství vláken úmyslně a jejich rozptýlením upravit chování a možnost dalšího využití v různých aspektech geotechniky. Vyztužení vlákny nabízí slibnou variantu zlepšení vlastností nevyhovující zeminy v hůře přístupných podmínkách, kde není možné použít plošné výztužné prvky, ale také v případech stabilizace svahů.



*Obr. 1-1 Svah zpevněný kořeny stromů*



*Obr. 1-2 Kořeny vegetace přítomné v zemině*

Zlepšování a vyztužování zemin je jedním z důležitých problémů každé dopravní stavby. Vzhledem k tomu, že ve většině případů bývají tyto stavby liniového charakteru a procházejí různými oblastmi s různými geotechnickými podmínkami, není ekonomické zeminu, která nám svými parametry nevyhovuje, odstranit a nahradit jí zeminou s příhodnějšími vlastnostmi. Tento radikální postup lze aplikovat pouze na poměrně krátkém úseku, kde mechanické vlastnosti zeminy neodpovídají požadavkům dané dopravní stavby a ani vyztužení pomocí geosyntetik nebo zlepšení pomocí pojiv by nepřineslo dostatečný efekt. Pokud by šlo o delší úsek, náklady na dopravu nevhodné zeminy ze staveniště, a také dopravu vhodného materiálu na staveniště, by dosahovaly neúměrně vysokých hodnot. Z tohoto důvodu jsou možné způsoby úpravy nevyhovující zeminy v podloží důležitým aspektem každé, nejen liniové, dopravní stavby.

V pozemních komunikacích je využíváno přednostně mechanické zlepšení. Podkladní vrstvy jsou rozprostřeny a následně dochází k hutnění statickými nebo vibračními metodami. Tímto způsobem vznikají vrstvy nestmelené a jejich použití bývá obvyklé pod netuhé vozovky. Dále je možné zeminy zlepšit přidáním hydraulického pojiva. Tyto vrstvy se nazývají stmelené a jsou vhodné pod tuhé vozovky.

V železničním stavitelství je také nutné zajistit dostatečnou únosnost zemní pláně. V této oblasti je možné dosáhnout kýžených výsledků smísením zeminy s pojivem, používané jsou vápno (pro jemnozrnné) a cement (pro hrubozrnné zeminy). Obvyklé je použití plošných geosyntetik – geotextilií a geomříží.

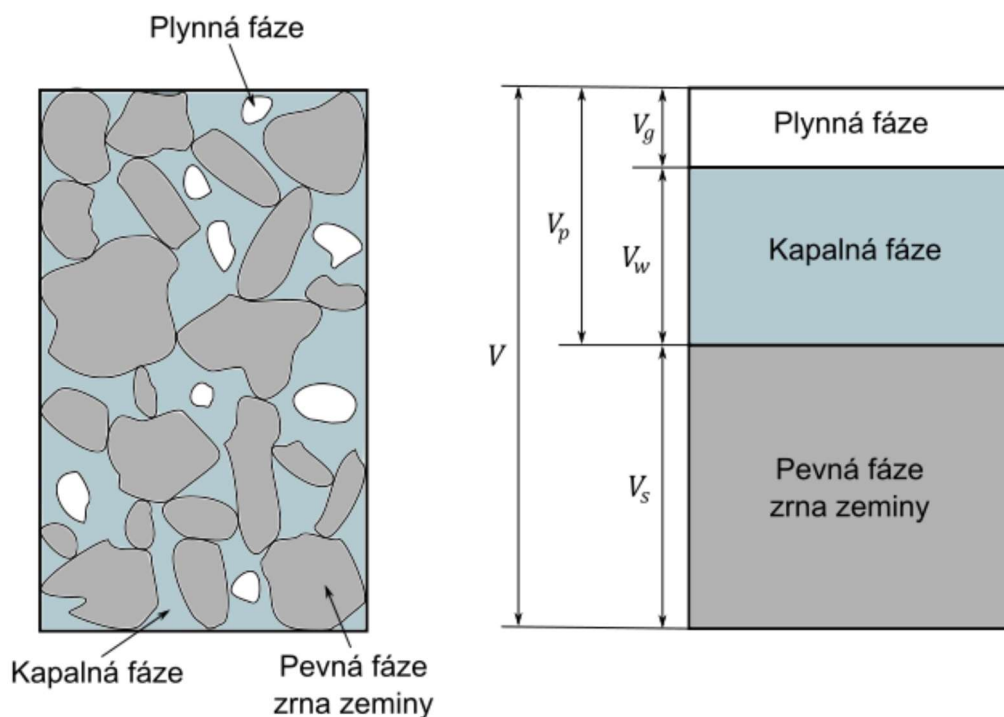
Použitím rozptýlené výztuže do konstrukce vozovek se zabývali Santoni, Tingle a Webster (2001). Tento způsob vyztužování, na rozdíl od použití geosyntetik, je zatím málo prozkoumaný a nabízí slibnou alternativu klasickým způsobům zlepšování.

## 2 MECHANICKÉ CHOVÁNÍ ZEMINY S ROZPTÝLENÝMI VLÁKNY

### 2.1 Složení zeminy vyztužené rozptýlenými vlákny

Jakákoliv zemina se obecně skládá ze tří fází. Najdeme zde pevnou fázi - zrna, která tvoří kostru a dále výplň prostor mezi zrny. Tu může tvořit plynná fáze – vzduch nebo i jiné plyny a kapalná fáze – voda nebo jiná kapalina. Dále mohou být tyto dvě složky kombinovány v různém poměru. Tyto stavy se nazývají stav suchý, v případě že není přítomna žádná kapalná složka, a stav plně nasycený, kde jsou naopak veškeré prostory mezi zrny vyplněny vodou a není přítomna plynná složka.

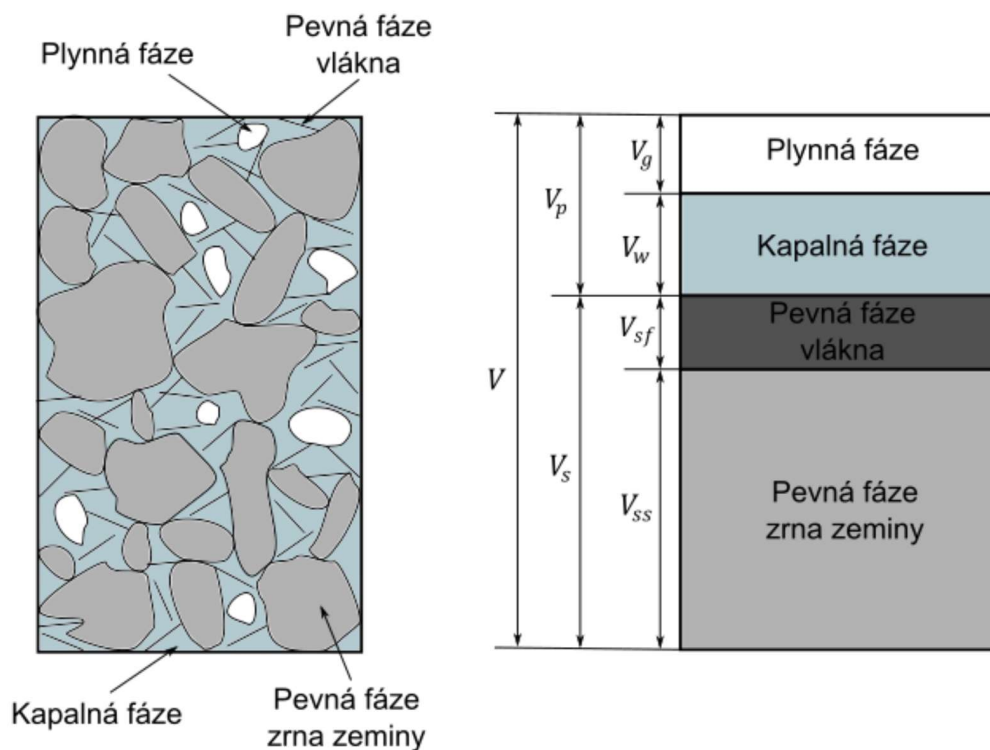
V mechanice zemin se primárně řeší tyto dva extrémní stavy – dokonale suchý a plně nasycený, ačkoliv v praxi se vyskytují jen zřídka. Ve valné většině případů je zemina nasycena pouze částečně, tedy můžeme pozorovat výskyt všech tří fází – viz Obr. 2-1.



Obr. 2-1 Fáze nevyztužené zeminy



V případě zeminy vyztužené rozptýlenými vlákny tomu není jinak. Stále se jedná o tři fáze – pevnou, kapalnou a plynnou, ovšem v tomto případě je pevná fáze tvořena nejen zrny zeminy, ale také právě vlákna – viz Obr. 2-2.



Obr. 2-2 Fáze vyztužené zeminy

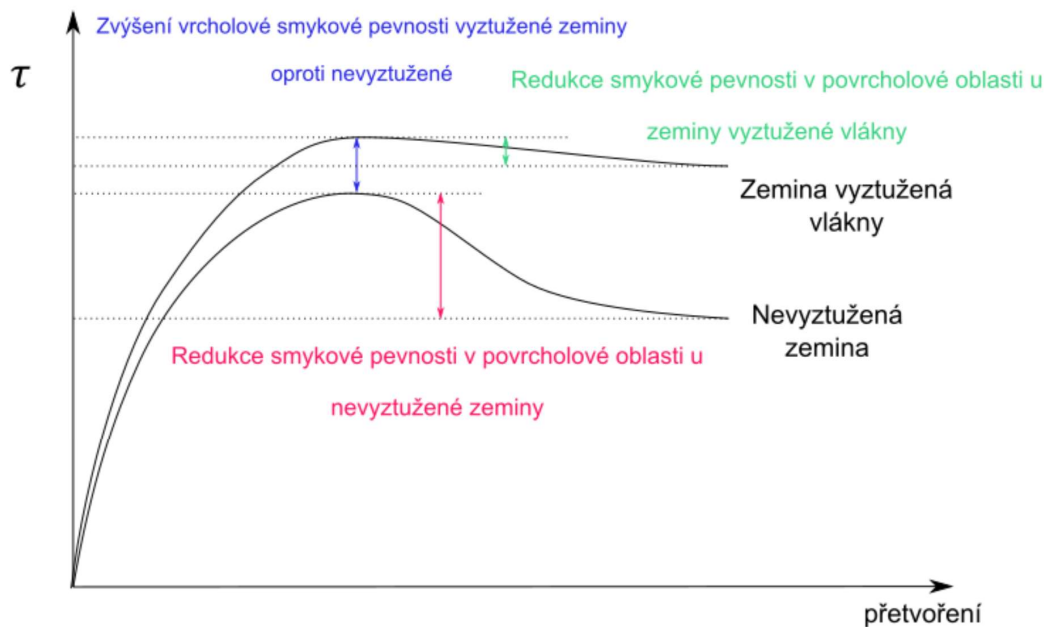
## 2.2 Chování kompozitu

Efekt vyztužení zeminy vlákny je obecně funkcí zejména následujících parametrů:

- Vlastnosti výztuže - geometrie (délka, průměr, poměr stran), materiál a koncentrace
- Vlastnosti vyztužované zeminy – zrnitost, úhel vnitřního tření, koheze
- Způsob namáhání

Jedním z hlavních benefitů použití rozptýlené výztuže je zvýšení vrcholové smykové pevnosti spojené s omezením redukce smykové odolnosti v oblasti smykového změkčování. Znázornění tohoto vlivu nabízí Obr. 2-3.





Obr. 2-3 Ukázka možného průběhu smykové pevnosti v závislosti na přetvoření

Vrcholová smyková pevnost se zvyšuje společně s obsahem vláken a jejich délkou až do limitního množství, po jehož dosažení už další přidávání množství vláken a zvyšování délky nemá další vliv na zvyšování smykové pevnosti.

Díky své velikosti, materiálovým vlastnostem a tření na povrchu poskytují vlákna zvýšení koheze a úhlu vnitřního tření. Může docházet k nárůstu koheze i v typicky nesoudržných zeminách jako jsou například písky, v takovém případě se používá pojem zdánlivá koheze (Arteaga 1989, Liausu a Juran 1995, Stauffer a Holtz 1995). Zároveň se zvýšením pevnosti dochází také ke zvýšení přetvoření, ke kterému dochází těsně před kolapsem (zvýšení duktility).

Zemina vyztužená vlákny se většinou modeluje jako kompozit s ekvivalentní smykovou pevností – ekvivalentní kohezí a úhlem vnitřního tření. Cílem prací zabývajících se tímto tématem je předvídání těchto ekvivalentních vlastností na základě jednotlivých vlastností vláken a nevyztužené zeminy.

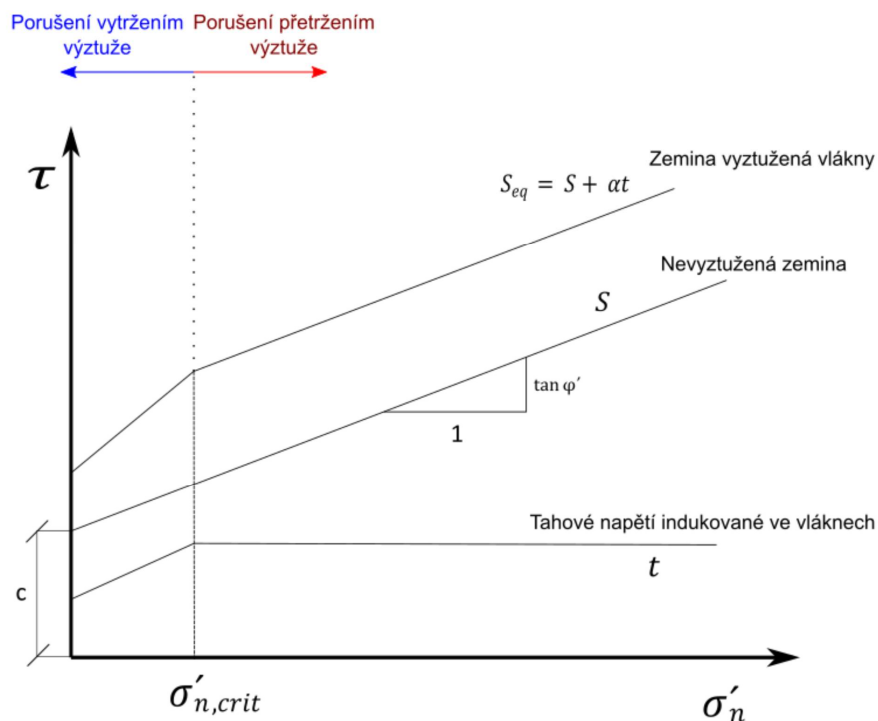
## 2.3 Definice ekvivalentních parametrů vyztužené zeminy

Zornberg (2002) definoval v jedné ze svých prací ekvivalentní smykovou pevnost  $S_{eq}$  na základě mobilizace tahových napětí ve vláknech.

$$S_{eq} = S + \alpha t = c + \sigma_n \tan \varphi + \alpha t \quad (2-1)$$

kde  $S$  je smyková pevnost nevyztužené zeminy,  $\alpha$  je empirický koeficient zahrnující orientaci vláken a  $t$  je tahové napětí vyvozené ve vláknech a je definováno jako poměr tahové síly ku ploše vlákna. Dále  $c$  a  $\varphi$  jsou smykové parametry nevyztužené zeminy, konkrétně koheze a úhel vnitřního tření.

V práci Li a Zornberg (2013) byl získán vzorec pro výpočet tahového napětí  $t$ . Na Obr. 2-4 je zobrazený bilineární diagram znázorňující ekvivalentní smykovou pevnost v závislosti na parametrech.



Obr. 2-4 Graf příspěvku rozptýlené výztuže

V první lineární části ( $\sigma'_n < \sigma'_{n,crit}$ ) převládá porušení vytržením výztuže a  $t$  je v základním Zornbergově (2002) vzorci nahrazeno veličinou  $t_p$ , tedy tahovým napětím vyvozeným ve vláknech v momentě porušení vytržením výztuže ze zeminy. V druhé lineární části ( $\sigma'_n > \sigma'_{n,crit}$ ) je rozhodující přetržení výztuže, tedy  $t$  je nahrazeno veličinou  $t_t$ , tahovým napětím vyvozeným ve vláknech při přetržení vláken.

### 2.3.1 Porušení vytržením výztuže ze zeminy

Při nízkém normálovém napětí ( $\sigma'_n < \sigma'_{n,crit}$ ) lze napětí  $t_p$  lze odhadnout jako

$$t_p = \chi * \eta * (c_{i,c} \cdot c + c_{i,\varphi} \cdot \tan \varphi \cdot \sigma_{n,ave}) \quad (2-2)$$

kde  $\eta$  je poměr stran vlákna, definovaný jako poměr délky vlákna k ekvivalentnímu průměru jednotlivých vláken.  $\chi$  je objemový podíl vláken definovaný jako poměr objemu vláken k objemu celého vzorku vyztuženého vlákny (podrobněji o určení podílu vláken v zemině vyztužené vlákny v kapitole 3.5).  $\sigma_{n,ave}$  je průměrné normálové napětí působící ve vláknech. Koeficienty  $c_{i,c}$  a  $c_{i,\varphi}$  jsou v literatuře používány poměrně často a dají se vyčíslit

$$c_{i,c} = \frac{a}{c} \quad (2-3)$$

$$c_{i,\varphi} = \frac{\tan \delta}{\tan \varphi} \quad (2-4)$$

kde  $a$  je třecí součinitel smykové pevnosti mezi zrny zeminy a vláknem,  $c$  je soudržnost samotné nevyztužené zeminy,  $\varphi$  úhel vnitřního tření a  $\delta$  součinitel vyjadřující vliv tření mezi vlákny a zeminou.

Pro výpočet ekvivalentní smykové pevnosti pro oblast, kde rozhoduje vytržení výztuže ze zeminy lze použít vzorec

$$S_{eq,p} = c_{eq,p} + (\tan \varphi)_{eq,p} \cdot \sigma_n \quad (2-5)$$

Dále je nutné pro výpočet definovat parametry  $c_{eq,p}$  a  $(\tan \varphi)_{eq,p}$ .

$$c_{eq,p} = (1 + \alpha \cdot \eta \cdot \chi \cdot c_{i,c}) \cdot c \quad (2-6)$$

$$(\tan \varphi)_{eq,p} = (1 + \alpha \cdot \eta \cdot \chi \cdot c_{i,\varphi}) \cdot \tan \varphi \quad (2-7)$$

kde  $\alpha$  je empirický součinitel zahrnující orientaci vláken.

### 2.3.2 Porušení přetržením výztuže

V druhé části grafu (Obr. 2-4) dochází k přetržení výztuže. Normálová napětí při kterých k tomuto dochází ( $\sigma'_n > \sigma'_{n,crit}$ ) jsou však velmi vysoká, proto tento způsob porušení obvykle není rozhodující. Je zřejmé, že pokud použijeme vlákna, která budou mít malou únosnost v tahu (například vlákna s velmi malou průřezovou plochou), bude smyková pevnost touto skutečností významně ovlivněna. Napětí  $t_t$  je v tomto případě funkcí množství vláken obsažených v zemině a únosností materiálu, ze kterého máme vlákna vyrobená. Vzorec pro výpočet je určen

$$t_t = \chi \cdot \sigma_{f,ult} \quad (2-8)$$

kde  $\chi$  je objemový obsah vláken v zemině,  $\sigma_{f,ult}$  je maximální napětí v jednotlivých vláknech. Pokud známe napětí  $t_t$ , můžeme odvodit vzorec pro výpočet ekvivalentní smykové pevnosti pro oblast porušení přetržením vláken

$$S_{eq,t} = c_{eq,t} + (\tan \varphi)_{eq,t} \cdot \sigma_n \quad (2-9)$$

Nyní už je třeba pouze definovat hodnotu parametrů  $c_{eq,t}$  a  $(\tan \varphi)_{eq,t}$

$$c_{eq,t} = c + \alpha \cdot \chi \cdot \sigma_{f,ult} \quad (2-10)$$

$$(\tan \varphi)_{eq,t} = \tan \varphi \quad (2-11)$$

### **2.3.3 Zhodnocení způsobu výpočtu ekvivalentních parametrů**

Výše popsany materiálův model podle Li a Zornberg (2013) nabízí poměrně přesný a jednoduchý postup, jak z parametrů nevyztužené zeminy a parametrů vláken získat ekvivalentní smykovou pevnost vyztužené zeminy. Je zde ovšem jedna velká neznámá, a to parametry tření mezi vlákny a zrny zeminy (ve vzorcích vyjádřeny jako  $a$ ,  $\delta$ ). Tyto parametry je nutné získat ze zkoušek (např. zkouška vytržení výztuže viz kapitola 4.4). V neposlední řadě nám schází hodnota parametru  $\alpha$ , který je nazván empirický koeficient zahrnující orientaci vláken. Jak již název napovídá, je nutné tuto veličinu vyčíslit empiricky. Je tedy nezbytné provést dostatečné množství testů (např. triaxiálních zkoušek – kapitola 4.2).

### **2.3.4 Predikce ekvivalentních smykových parametrů**

Pro stavebního inženýra není ani tak důležité znát ekvivalentní smykovou pevnost, nýbrž smykové parametry vyztužené zeminy jako jsou koheze a úhel vnitřního tření. Pomocí Zornbergova (2002) modelu lze po stanovení předpokládaných součinitelů odhadnout zlepšení těchto smykových parametrů. V následující tabulce (Tab. 2-1 a Tab. 2-2) můžeme vidět, jakých hodnot koheze a úhlu vnitřního tření lze dosáhnout pomocí vyztužení rozptýlenými vlákny. Již při malých hmotnostních podílech polypropylenových vláken v zemině dochází k nárůstu ekvivalentních smykových parametrů.

Je ovšem nutné vzít v úvahu, že ekvivalentní smykové parametry uvedené v Tab. 2-1 a Tab. 2-2 jsou pouze predikcí spočítanou na základě Zornbergova (2002) modelu. Skutečné parametry se mohou lišit.

Tab. 2-1 Souhrn predikovaných ekvivalentních smykových parametrů (převzato z Zornberg 2002)

Typ zeminy	Průměr [mm]	Délka [mm]	Obsah vláken [%]	c [kPa]	$\varphi$ [°]	$c_{eq}$ [kPa]	$\varphi_{eq}$ [°]
CL (1)	0,62	50	0,2	12,2	31,2	14,3	35,7
CL (1)	0,62	50	0,4	12,2	31,2	16,6	39,9
CL (1)	0,62	25	0,2	12,2	31,2	13,1	33,4
CL (1)	0,62	25	0,4	12,2	31,2	14,3	35,7
SP (2)	0,23	50	0,2	6,1	34,3	9,8	47,5
SP (2)	0,23	50	0,4	6,1	34,3	13,5	56,3
SP (2)	0,23	25	0,2	6,1	34,3	8	41,6
SP (2)	0,23	25	0,4	6,1	34,3	9,8	47,5

Tab. 2-2 Pokračování Tab. 2-1

Typ zeminy	Průměr [mm]	Délka [mm]	Obsah vláken [%]	c [kPa]	$\varphi$ [°]	$c_{eq}$ [kPa]	$\varphi_{eq}$ [°]
CL (3)	0,62	50	0,2	11,2	26,2	13,9	31,2
CL (4)	0,62	50	0,2	10,5	24,1	12,9	28,7
SM (5)	0,62	50	0,2	5,6	35,8	6,6	41,7
CH (6)	0,62	50	0,2	28,8	11,2	34,6	13,4

Ekvivalentní koheze vzorků vyztužených rozptýlenými vlákny byla vypočítána pomocí vzorce (2-6) a koheze nevyztužené zeminy byla zjištěna laboratorně. Ekvivalentní úhel vnitřního tření byl vypočítán pomocí vzorce (2-7) a úhel vnitřního tření na nevyztužené zemině byl, stejně jako koheze, zjištěn laboratorně. Ve všech predikcích byly použity koeficienty  $c_{i,c} = 0,8$ ,  $c_{i,\varphi} = 0,8$  a  $\alpha = 1$ .

### 3 PARAMETRY VÝZTUŽE

V této kapitole se podíváme podrobněji na vlastnosti používaných typů rozptýlené výztuže. Ačkoliv byly první zkoušky zeminy s rozptýlenými vlákny provedeny již v 70. letech minulého století, neexistuje žádná studie, která by prokázala, že určitý typ vláken, co se týče materiálu, geometrie a jejího podílu v zemině, je ten nejlepší. Každý, kdo se zabývá tématem zeminy vyztužené vlákny, zkouší různé materiály výztuže, zkoumá vliv geometrie a povrchové úpravy. Proto také existuje tolik možných typů vláken.

Pojmem vlákno se rozumí jednotka charakterizovaná pružností, velikostí a poměrem délky ku tloušťce nebo průměru.

#### 3.1 Materiál výztuže

Obecně se dá říci, že pro vyztužování zemin lze použít přírodní, syntetická i kovová vlákna. Dále mohou být použity i odpadní materiály z různých odvětví průmyslu, avšak pouze s podmínkou jejich bezpečnosti a nezávadnosti. Vzhledem k tomu, že se koncept vyztužené zeminy zrodil z pozorování vlivu kořenů vegetace na pevnost zeminy, je logické, že materiál prvních vláken použitých záměrně pro vyztužení zeminy byl materiál přírodní.

##### 3.1.1 Přírodní vlákna

Přírodní vlákna mají výhodu příznivé ceny, jsou snadno dostupná, dále pak dostatečně pevná a v neposlední řadě lze uvést jejich příznivý vliv na životní prostředí. Bývá snahou používat přírodní vlákna, která pocházejí z daného území, jak z hlediska ekonomiky, tak přírodních podmínek v zemním prostředí. Gray a Ohashi (1983) například prováděli testy s vlákny z rákosí (latinsky *Phragmites communis*) a z palmy palmyra (latinsky *Borassus flabelliformis*). Dále byly zkoumány vlastnosti dalších přírodních vláken (Shukla 2017). Lze uvést například kokosová vlákna, jutu, štěpky ze dřeva, bambusová vlákna, sisal, listy palem, různé druhy travin, banánová vlákna, kukuřičné stonky, ovesné a lněné stonky, bavlněná vlákna. Používají se také bambusové mříže a rohože jako náhrada za vyztužení geosyntetiky.

Z těchto zmíněných přírodních vláken má nejvyšší tahovou pevnost kokosové vlákno a zachovává si své vlastnosti i ve vlhkém prostředí. Jedná se o přírodně rozložitelný materiál s obsahem 40 % ligninu a 54 % celulózy. Díky vysokému obsahu ligninu se rozkládá pomalu a může hrát svoji roli i v delším časovém období (1 až 2 roky), dokonce i ve slaném prostředí. Jako jediný přírodní materiál ze všech zkoušených je kokosové vlákno odolné vůči působení alkalického prostředí.

Oproti tomu mají bambusová vlákna velmi vysokou pevnost v tahu, ale zároveň nízký modul pružnosti a vysokou absorpci vody.

Přírodní vlákna však ztrácí svoji pevnost a další charakteristiky při smísení se zeminou, přičemž velikost této ztráty závisí na typu vlákna. Problém rozkladu přírodních materiálů v zemině lze vyřešit vhodnými metodami, jako například chemickým ošetřením, ošetřením enzymy, fyzikálními a chemickými nátěry pomocí syntetických polymerů nebo pryskyřic, případně antimikrobiálním nátěrem. Tato ošetření ovšem stojí další náklady navíc.

Přesto mohou být přírodní vlákna použita jako nízkonákladová varianta vyztužení materiálů nebo příměsí pro zlepšení inženýrských vlastností málo únosných zemín nebo podobných materiálů. Dají se použít například pro konstrukci vozovek v lesních oblastech nebo alespoň jako krátkodobé řešení pro omezení eroze, kde vyztužení jinými typy vláken nemá význam.

### **3.1.2 Syntetická vlákna**

Oproti přírodním vláknům mají syntetická vlákna dvě velké výhody. Díky jejich umělé výrobě lze jejich tvar a úpravu povrchu snadno přizpůsobit podle účelu použití a požadovaných parametrů. Dále jsou syntetická vlákna o poznání trvanlivější a nepodléhají snadno rozkladu při působení vlhkosti, tepla, chladu ani slunečního záření, tak jako vlákna přírodní.

Mezi používané syntetické materiály pro výrobu vláken patří sklo, uhlík a některé druhy kovů. Dále se jedná o různé syntetické polymery, například polypropylen, polyester, polyethylen, polyamid.



### 3.1.2.1 Polymerní vlákna

Polymerní vlákna mohou degradovat z různých příčin. Nad zemí patří mezi aspekty způsobující degradaci materiálu například ultrafialová složka slunečního záření, teplo, působení kyslíku a vlhkosti. Pod zemí jsou hlavní faktory ohrožující trvanlivost polymerních materiálů rozměry zrn zeminy (obzvlášť pokud se jedná o částice ostré), přílišná kyselost nebo zásaditost prostředí, ionty těžkých kovů, přítomnost kyslíku, obsah vody, organismy přítomné v zemině a teplota. V Tab. 3-1 jsou uvedeny odolnosti vybraných polymerních materiálů vůči konkrétním vlivům způsobujícím degradaci.

Tab. 3-1 Porovnání odolnosti vybraných polymerních materiálů (převzato z Shukla S. K. – *Fundamentals of Fibre-Reinforced Soil Engineering*)

Faktor	Odolnost polymerních materiálů			
	polypropylen	polyester	polyethylen	polyamid
Ultrafialové záření (nestabilizované)	střední	vysoká	nízká	střední
Ultrafialové záření (stabilizované)	vysoká	vysoká	vysoká	střední
Zásady	vysoká	nízká	vysoká	vysoká
Kyseliny	vysoká	nízká	vysoká	nízká
Soli	vysoká	vysoká	vysoká	vysoká
Detergenty	vysoká	vysoká	vysoká	vysoká
Suché teplo (až 100°C)	střední	vysoká	nízká	střední
Pára (až 100°C)	nízká	nízká	nízká	střední
Reakce s vodou	vysoká	vysoká	vysoká	vysoká
Mikroorganismy	vysoká	vysoká	vysoká	střední
Tečení (creep)	nízká	vysoká	nízká	střední

Základní vlastnosti těchto polymerů jsou uvedeny v Tab. 3-2. Dále je nutné zmínit, že reakce polymerních materiálů na uvedené vlivy je obvykle pomalá a dá se zpomalit různými aditivami. Specifická hmotnost  $SG_{skut}$  je bezrozměrná veličina určená jako poměr hustoty daného materiálu ku hustotě vody dle (3-12).

$$SG_{skut} = \frac{\rho_{materiálu}}{\rho_{H_2O}} \quad (3-12)$$

Tab. 3-2 Charakteristické vlastnosti polymerních materiálů (převzato z Shukla S. K. – *Fundamentals of Fibre-Reinforced Soil Engineering*)

Polymer	Specifická hmotnost [-]	Teplota tání [°C]	Tahová pevnost při 20°C [MPa]	E [GPa]	Protažení při porušení [%]
polypropylen	0,90-0,91	160-165	400-600	1,3-1,8	10-40
polyester	1,22-1,38	260	800-1200	12-18	8-15
polyethylen	0,91-0,96	100-135	80-600	0,2-1,4	10-80
PVC	1,38-1,55	160	20-50	2,7-3	50-150
polyamid	1,05-1,15	220-250	700-900	3-4	15-30

Nejrozšířenější polymer pro výrobu a experimentální zkoušení zeminy vyztužené vlákny je bezpochyby polypropylen. Hlavním důvodem je jeho nízká cena, dále se dobře mísí se zeminou a díky relativně vysokému bodu tání je možné umístit celý vyztužený vzorek do sušárny a zjistit tak vlhkost vzorku, aniž by došlo k porušení vláken. Další výhodou je vodoodpudivost a chemická inertnost polypropylenů. Ze zeminy neodvádí vlhkost ani případnou průsakovou vodu.

### 3.1.2.2 Kovová vlákna

Mezi další typ syntetických vláken patří i vlákna kovová. V studii Gray a Ohashi (1983) byl použit pro přímé smykové zkoušky jako vlákno měděný drát. Dále Michalowski a Čermák (2003) použili ve svých triaxiálních testech vlákna z galvanizované oceli. Kovová vlákna mají výhodu velmi vysokého modulu pružnosti, nedochází u nich snadno ke ztrátě tvaru. Bohužel je jejich velká nevýhoda nestálost ve vlhkém prostředí a při působení zásad a kyselin. Proto jsou vybírány materiály buď přirozeně nekorodující nebo s odpovídající povrchovou úpravou.

### 3.1.3 Odpadní materiály

Využívání druhotných surovin je v dnešní době velké environmentální téma. Odpadní plastový materiál nebo také staré pneumatiky jsou dostupné ve velkém množství celosvětově. Proto se dají použít ve stavebních projektech v různých tvarech, především ve formě granulí, štěpek nebo vláken. V opačném případě mohou skončit na skládce a zabrat tak velkou plochu využitelnou pro jiné účely. Použitím odpadních materiálů pro výrobu vláken pro vyztužení zeminy lze omezit jejich dopad na životní prostředí.

Typ vláken a štěpek z použitých pneumatik je závislý na přístroji, který pneumatiky drtí. Jejich specifická hmotnost bývá obvykle 1,13-1,36 (s průměrnou hodnotou 1,22) v závislosti na obsahu kovových částic. V případě, že materiál neobsahuje žádné kovové částice, bývá specifická hmotnost bez větších odchylek 1,15. Vlákná z gumy jsou vedlejším produktem recyklace pneumatik, mají podlouhlý tvar s různorodou délkou a velkou pevností a průtažností, mohou být tedy použita jako výztuž zeminy.

Youwai a Bergado (2003) se zabývali zkoušením směsí štěpek pneumatik a písku v různém poměru. Takováto směs má menší objemovou hmotnost, než samotný písek, je proto možné ji použít jako odlehčenou alternativu například pro budování násypů. Směs pouze gumy, bez příměsi písku, má velmi vysoký úhel vnitřního tření (37-40° pro volně nasypané štěpky a až 85° pro hutněné – Edil a Bossher 1994). Přidáním gumových štěpek (o velikosti 12-50 mm) do písku získáme nejenom vylehčenou směs, ale také docílíme zvýšení úhlu vnitřního tření. Youwai a Bergado (2003) ve své práci provedli 18 triaxiálních zkoušek na vzorcích s různými hmotnostními poměry gumy a písku – konkrétně 20:80, 30:70, 40:60 a 50:50. Přidáním písku do gumy získali směs s vyšším úhlem vnitřního tření (z 30° na 34° při zvyšování množství písku). Při zvyšujícím se komorovém tlaku se zvyšovala smyková pevnost směsi. Nevýhodou vysokého podílu gumy v této směsi je ovšem určitá hodnota stlačitelnosti, neboť Poissonovo číslo je v tomto případě velmi blízké 0,5. Nejlepší hodnoty, kdy stlačitelnost dosáhla nižších hodnot než samotný písek, vykazaly směsi s poměrem gumy k písku mezi 30:70 a 40:60.

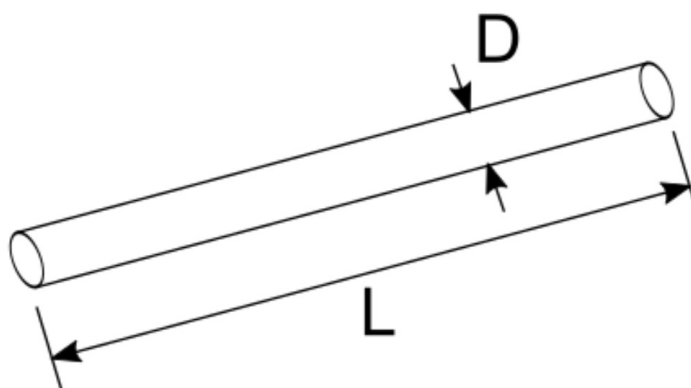
Mirzababaei, Miraftab, Mohamed a McMahon (2013) prováděli také zkoušení zemin vyztužených odpadním materiálem. V tomto případě se jednalo o odpadní vlákna při výrobě koberců a vyztužovaná zemina byl jíla. Byly použity dva druhy vláken – GBF (složení: 60 % polypropylen, 20 % latex, 15 % nylon, 5 % vlna) o délce 2-20 mm a průměru 20-1500  $\mu\text{m}$  a ABF (složení: 100 % nylon) o délce 2-5 mm a průměru 60-100  $\mu\text{m}$ . Zeminová složka měla 90 % obsah jílu a 10 % obsah sodíkem aktivovaného bentonitu, následně do ní byl přidán relativně vysoký obsah vláken (až 5 % hmotnostního poměru). Pro mísení směsi byly použity různé metody. Takto připravená směs byla následně hutněna zkouškou Proctor standard. Následně byly vzorky podrobeny přímé tlakové zkoušce. Zatímco vzorky nevyztuženého jílu a nevyztuženého jílu s bentonitem vykazovaly křehké chování, se zvyšováním obsahu vláken se zvyšovala duktilita a

dokonce se s 5 % podílem vláken v kompozitu objevilo zpevňování při zvyšování přetvoření.

### 3.2 Geometrie rozptýlené výztuže

Důležitým aspektem každého vyztužování je rozměr vláken. V každé z předchozích prací je k tomuto problému přistupováno jinak, neboť je tento parametr stále předmětem výzkumu. Většinou jde o přímá vlákna válcovitého tvaru (viz Obr. 3-1) s různým poměrem stran ( $\alpha_t$ ) a dále poměr velikosti vláken ku velikosti zrn vyztužované zeminy.

$$\alpha_t = \frac{L}{D} \quad (3-13)$$



*Obr. 3-1 Rozměry typického vlákna*

#### 3.2.1 Délka vláken

V různých studiích jsou délky vláken velmi různorodé. Od krátkých vláken o délce 6 mm (Eldesouky, Morsy a Mansour 2015), 20 mm (Gray a Ohashi 1983), přes obvyklé 25-76 mm, neboli 1-3 palce v imperiálních jednotkách (Li a Zornberg 2013, Michalowski a Čermák 2003, Santoni, Tingle a Webster 2001), až po dlouhá vlákna o délkách 250 mm (Gray a Ohashi 1983). V závislosti na délce rozlišujeme (dle Agarwal a Lawrence 1980, Hoover a kol. 1982) krátká vlákna o délce do 76,2 mm (3 palce) a dlouhá neboli průběžná vlákna o délce vyšší než 76,2 mm. Srovnání různých materiálových a geometrických

charakteristik z různých studií, které se zabývaly tímto tématem nabízí Tab. 3-3 a Tab. 3-4.

### 3.2.2 Průměr vláken

Stejně jako délka vláken je i průměr vláken různý. Jeho hodnota se může pohybovat od tisícín milimetru až k nízkým jednotkám milimetrů. Konkrétní příklady hodnot jsou uvedeny v Tab. 3-3. Ve většině případů jde o vlákna s kruhovým průřezem. Jejich častý výskyt v předchozích studiích je podmíněn způsobem vzniku těchto vláken, tedy dělením jednoho dlouhého kusu běžně dostupného drátu na díly požadované délky. Dalším faktorem hrajícím právě pro kruhové průřezy je fakt, že kruh má největší obvod při zachování co nejmenšího obsahu.

Specifikem tohoto tématu je nepřímý způsob uvádění průměru vláken. Jde v podstatě o vyjádření liniové hmotnosti převzaté z textilního průmyslu. Místo (v některých případech obtížně měřitelného) průměru vlákna se použije jednotka denier nebo tex.

#### 3.2.2.1 Denier

Denier je jednotka liniové hmotnosti. Jde o hmotnost vlákna o délce 9000 metrů (3-14).

$$1 \text{ denier} = \frac{1 \text{ g}}{9 \text{ km}} \quad (3-14)$$

V případě, že víme z jakého materiálu je vlákno vyrobeno, lze z této hodnoty snadno dopočítat skutečný průměr. Za předpokladu vlákna válcového tvaru lze použít následující postup (3-15).

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho} \rightarrow \frac{\pi d^2 L}{4} = \frac{m}{\rho} \quad (3-15)$$

Pokud za  $L$  dosadíme 9000 m a následně  $m$  nahradíme hodnotou liniové hmotnosti v denierech, vypočítáme průměr vlákna válcovitého tvaru dle (3-16).

$$d = \sqrt{\frac{m_{lin(denier)}}{2,250\rho\pi}} \quad (3-16)$$

Uvedme konkrétní příklad: polypropylenové vlákno o liniové hmotnosti 1000 denier. U polypropylenu budeme uvažovat hustotu  $\rho = 946 \text{ kg/m}^3$ . Dosadíme do vzorce za  $m_{lin(denier)}$  hodnotu v denierech a za  $\rho$  hodnotu v  $\text{kg/m}^3$ .

$$d = \sqrt{\frac{m_{lin(denier)}}{2,250\rho\pi}} = \sqrt{\frac{1000}{2,250 * 946 * \pi}} = 0,39 \text{ mm} \quad (3-17)$$

### 3.2.2.2 Tex

Kromě nepřímého stanovení průměru vlákna pomocí jednotky denier (1g na 9 km) lze použít i jednotku zvanou tex. Jedná se také o liniovou hmotnost, jen s rozdílem jiné referenční délky. Tex je definován jako hmotnost v gramech na 1 km vlákna,  $1 \text{ tex} = 1/9 \text{ denier}$ . Pro výpočet průměru vlákna válcového tvaru ze známých hodnot liniové hmotnosti v texech a hustoty materiálu použijeme následující vzorec.

$$d = \sqrt{\frac{m_{lin(tex)}}{0,250\rho\pi}} \quad (3-18)$$

### 3.3 Konkrétní příklady kombinací materiálu a rozměrů v různých podkladech

Tab. 3-3 Příklady některých použitých kombinací materiálů a geometrie

Materiál	Typ	Průměr D [mm]	Délka L [mm]	Zdroj	Poznámka
Rákosí (Phragmites Communis)	-	1,8	20-250	Gray a Ohashi (1983)	-
PVC	-	2,2	20-250	Gray a Ohashi (1983)	-
Palmyra (Borassus Flabelliformis)	-	1,2	20-250	Gray a Ohashi (1983)	-
Měď	drát	1	20-250	Gray a Ohashi (1983)	-
Polypropylen	vroubkovaný a hladký	0,23	25 a 50	Li a Zornberg (2013)	360 denier
		0,39	25 a 50	Li a Zornberg (2013)	1000 denier
Polypropylen	vroubkovaný	0,74	50	Li a Zornberg (2013)	3620 denier
Polyamid	-	0,3	25,4	Michalowski a Čermák (2003)	L= 1 palec
Galvanizovaná ocel	-	0,3	25,4	Michalowski a Čermák (2003)	-
Polypropylen	-	0,3	25,4	Michalowski a Čermák (2003)	-
Polypropylen	monovláknó	0,025	19 a 51	Santoni a kol. (2001)	4 denier
		0,048	19 a 51	Santoni a kol. (2001)	15 denier
		0,056	13 a 25 a 51	Santoni a kol. (2001)	20 denier
Polypropylen	vroubkovaný	0,232	51 a 76	Santoni a kol. (2001)	360 denier
		0,387	13 a 25 a 51 a 76	Santoni a kol. (2001)	1000 denier

Tab. 3-4 Pokračování Tab. 3-3

Materiál	Typ	Průměr D [mm]	Délka L [mm]	Zdroj	Poznámka
Polypropylen	vroubkovaný a páska	0,23	25 a 51	Li a Zornberg (2003)	
Polypropylen	vroubkovaný a páska	0,39	25 a 51	Li a Zornberg (2003)	soudržná zemina
Polypropylen	vroubkovaný	0,62	25 a 51	Li a Zornberg (2003)	-
Polypropylen	-	0,05	6	Eldesouky a kol. (2015)	-
Polypropylen	-	0,23	25 a 50	Zornberg (2002)	360 denier
Polypropylen	-	0,62	25 a 50	Zornberg (2002)	2610 denier
Polypropylen	-	0,023	24	Consoli a kol. (2003)	-
GBF vlákna	odpadní	0,02-1,5	2-20	Mirzababaei a kol. (2013)	viz. Kapitola 3.1.3
ABF vlákna	odpadní	0,06-0,1	2-5	Mirzababaei a kol. (2013)	viz. Kapitola 3.1.3
Polypropylen	-	0,023	22	Uddin a kol. (2011)	+ cement
Polypropylen	-	0,023	12	Moradi a kol. (2017)	-
Polypropylen	-	0,031	3 a 6 a 9 a 12	Wei kol. (2018)	-

### 3.4 Povrchová úprava vláken

Z předchozích výzkumů také vyplývá, že úprava povrchu vláken významně ovlivňuje celkový příspěvek vyztužení na chování vzorku. Výrazně lépe si při zkouškách vedou vzorky s vlákny, jejichž povrch je nějakým způsobem upraven, jako například vroubky nebo drážkami.

Cílem těchto úprav je zajištění co nejvyššího tření mezi zrny zeminy a povrchem vláken. Obvykle bývá tření na povrchu vláken nižší než tření mezi jednotlivými zrny, proto je také častější způsob porušení vzorku vytržením vláken (viz dříve kapitola 2). Vzhledem k tomu, že smyková pevnost je mnohem menší v případě vytržení vláken než v případě přetržení vláken, je snahou co nejvíce zvýšit tření mezi vlákny a zrny zeminy a dostat se



do stavu, kdy už o celkové smykové pevnosti vzorku rozhoduje pouze únosnost samotných vláken.

Naopak v případě velmi nízkého tření mezi vlákny a zrný zeminy dojde při zatěžování velmi brzy k prokluzu vláken a následně ke kolapsu vzorku po takto předurčené oslabené ploše.

### **3.5 Podíl/koncentrace vláken**

K určení podílu vláken ve vzorku vyztužené zeminy existují dva různé přístupy. Společným znakem je udávání tohoto podílu v procentech a vztahení množství vláken k množství zeminy. Ale zatímco v některých pracích je používán podíl objemový, v jiných zase hmotnostní. Vzhledem k rozmanitosti používaných materiálů je existence dvou různých přístupů nepříliš komfortní pro srovnání některých postupů.

#### **3.5.1 Objemový podíl**

Větší vypovídající hodnotu má v tomto směru použití objemového podílu (značený  $\chi$ ), který je definován jako poměr objemu vláken ( $V_f$ ) ku objemu celého vzorku ( $V$ ) dle vztahu (3-19). Lépe se v tomto případě dá porovnávat efekt vláken z různých materiálů, protože ačkoliv je hmotnost rozdílná, objemové množství vláken ve vzorku je stejné.

$$\chi = \frac{V_f}{V} \quad (3-19)$$

#### **3.5.2 Hmotnostní poměr**

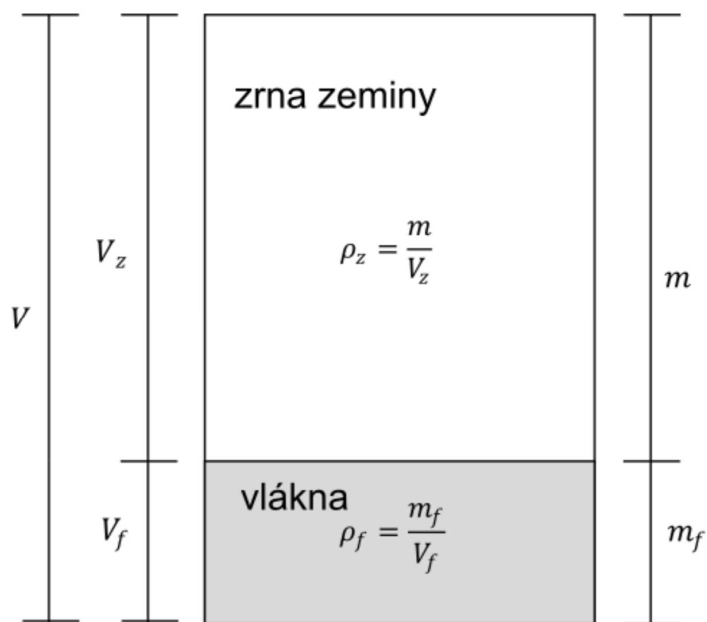
Hmotnostní poměr ( $\chi_w$ ), který je definován jako hmotnost vláken ( $m_f$ ) ku hmotnosti suché zeminy ( $m$ ), má v tomto směru velký nedostatek s ohledem na různý materiál vláken, ale jeho nespornou výhodou je snazší praktické odměření daného poměru.

$$\chi_w = \frac{m_f}{m} \quad (3-20)$$

### 3.5.3 Porovnání objemového a hmotnostního poměru

Pro příklad uveďme srovnání polypropylenových vláken a kovových vláken a uvažujme, že tvar a velikost vláken je stejná a liší se pouze hustotou materiálu. Pokud tedy připravíme dva vzorky se stejným hmotnostním poměrem s vlákny z různého materiálu, objemový poměr bude v tomto případě různý, a tedy na první pohled bude ve vzorku s polypropylenovými vlákny větší množství vláken než v tom s kovovými vlákny. Větší množství vláken souvisí s větší třecí plochou jednotlivých výztužných elementů, a tedy s potenciálním větším efektem na vlastnosti vzorku.

Pro příklad lze uvést konkrétní příklad přepočtu mezi objemovým ( $\chi$ ) a hmotnostním podílem ( $\chi_w$ ). Ten je možný za předpokladu, že známe hustotu materiálu vláken ( $\rho_f$ ) a objemovou hmotnost zeminy při aktuální míře hutnění ( $\rho_z$ ). V následujícím příkladě budeme zjednodušeně uvažovat hustotu polypropylenových vláken  $946 \text{ kg/m}^3$ , hustotu ocelových vláken  $7850 \text{ kg/m}^3$ , a objemovou hmotnost zeminy  $1700 \text{ kg/m}^3$ .



Obr. 3-2 Schéma pro porovnání objemového a hmotnostního podílu

Ze známých vzorců (3-19) a (3-20) a úvahy zobrazené na Obr. 3-2 lze vyjádřit vzorec (3-24) pro výpočet hmotnostního poměru zatímco známe objemový podíl.

$$\chi = \frac{V_f}{V} \rightarrow V_f = \chi V \quad (3-21)$$

$$m_f = \rho_f V_f = \rho_f \chi V \quad (3-22)$$

$$m = \rho_z V_z = \rho_z (V - V_f) = \rho_z (V - \chi V) \quad (3-23)$$

$$\chi_w = \frac{m_f}{m} = \frac{\rho_f \chi V}{\rho_z (V - \chi V)} = \frac{\rho_f \chi}{\rho_z (1 - \chi)} \quad (3-24)$$

Vzorec dále můžeme upravit pro výpočet objemového podílu v závislosti na hmotnostním (3-25).

$$\chi = \frac{V_f}{V} = \frac{\chi_w \rho_z}{\rho_f + \chi_w \rho_z} \quad (3-25)$$

Pomocí vzorců (3-24) a (3-25) a známých parametrů lze provést přepočet:

- Objemový podíl  $\chi = 0,5 \%$ :
  - Polypropylen  $\rho_f = 946 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$$\chi_w = \frac{\rho_f \chi}{\rho_z (1 - \chi)} = \frac{946 * 0,005}{1700 * (1 - 0,005)} = 0,28 \% \quad (3-26)$$

- Ocel  $\rho_f = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$$\chi_w = \frac{\rho_f \chi}{\rho_z (1 - \chi)} = \frac{7850 * 0,005}{1700 * (1 - 0,005)} = 2,32 \% \quad (3-27)$$

- Hmotnostní podíl  $\chi_w = 0,3 \%$

- Polypropylen  $\rho_f = 946 \text{ kg.m}^{-3}$

$$\chi = \frac{\chi_w \rho_z}{\rho_f + \chi_w \rho_z} = \frac{0,003 * 1700}{946 + 0,003 * 1700} = 0,54 \%$$
 (3-28)

- Ocel  $\rho_f = 7850 \text{ kg.m}^{-3}$

$$\chi = \frac{\chi_w \rho_z}{\rho_f + \chi_w \rho_z} = \frac{0,003 * 1700}{7850 + 0,003 * 1700} = 0,06 \%$$
 (3-29)

Jak je vidět ve výpočtech (3-26) až (3-29), hmotnostní a objemový podíl jsou velmi rozdílná vyjádření koncentrace vláken. Přepočet lze takto provést pouze za předpokladu, že známe jednotlivé objemové hmotnosti, což bývá často problém. Zejména pak hodnota objemové hmotnosti zeminy v daném stavu.

V případě, že máme všechna vlákna ze stejného materiálu a předmětem našeho zkoumání je pouze vliv množství výztuže na vlastnosti vzorku, je pro nás hmotnostní poměr naprosto dostačující a v laboratoři snadno proveditelný.

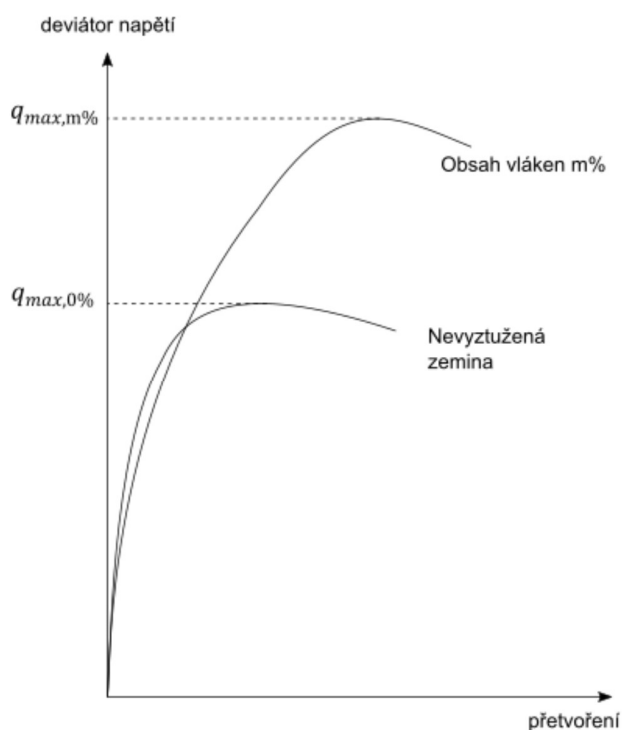
### 3.5.4 Plošný podíl vláken

V jedné z prvních studií zabývajících se vyztužením zeminy použitím rozptýlených vláken (Gray a Ohashi 1983) je použit ještě další způsob určení podílu vláken. Tato práce se zabývá pozorováním smykových vlastností vyztužené zeminy v přímém smyku. Vzhledem k tomu, že k porušení vzorku dochází na předem předurčené ploše oslabení a vlákna jsou orientována kolmo nebo pod stejným určeným úhlem, je podíl vláken ( $\chi_A$ ) určen pomocí plochy, tedy plocha vláken ( $A_R$ ) ku celkové smykové ploše ( $A$ ) dle vztahu (3-30).

$$\chi_A = \frac{A_R}{A}$$
 (3-30)

### 3.5.5 Vliv množství vláken na zlepšení vlastností

Z již provedených studií bylo zjištěno, že se zvyšováním koncentrace vláken dochází ke zvyšování smykové pevnosti. Při 2 % koncentrace vláken v písku může dojít až k 70 % zvýšení jeho smykové pevnosti. Tato úměrnost je omezena koncentrací vláken zhruba 20 %, kdy při dalším přidávání vláken již nedochází ke zvyšování efektu vyztužení.



Obr. 3-3 Vliv množství vláken na chování vyztužené zeminy

### 3.6 Vliv orientace vláken

Z podstaty zeminy vyztužené rozptýlenými vlákny je zřejmé, že poloha a orientace jednotlivých vláken bude klíčová. Pod pojmem rozptýlená vlákna se rozumí konzistentní směs zrn zeminy a vláken, kde nesmí vznikat shluky vláken ani větší oblasti bez přítomnosti vláken. Pro budoucí použití v praxi nelze zajistit, aby bylo všechno vyztužení orientováno jedním směrem, proto se výzkum soustředí právě na vzorky, kde orientace a poloha vláken je náhodná. S ohledem na směr namáhání ovšem nelze předpokládat, že by všechna jednotlivá vlákna byla namáhána stejnou intenzitou a způsobem namáhání.

Gray a Ohashi (1983) prováděli řadu přímých smykových zkoušek, při kterých zkoumali vliv orientace vláken vůči smykové ploše. Právě z jejich práce vyplývá, že nejvíce přispívají ke zvýšení pevnosti vzorku vlákna, v nichž dochází k tahu a vlákna, která jsou orientována tak, že jejich střední část protíná smyková plocha a vykazují odklon od této plochy  $60^\circ$ . Naopak vzorky, kde se nacházejí převážně tlačena vlákna, nevykazují žádné zlepšení mechanických vlastností, ba dokonce i zhoršení oproti nevyztužené zemině.

Michalowski a Čermák (2002) provedli sadu testů, v nichž zkoumali vliv orientace vláken. Do vzorku pro triaxiální zkoušku umístili do několika vrstev nejprve vlákna s vertikální orientací, dále sadu vzorků s několika vrstvami vláken s horizontální orientací. Pro porovnání provedli také zkoušky na nevyztuženém vzorku a na vzorku s náhodným rozmístěním vláken v celém objemu.

Nejlépe ze všech vzorků si vedl ten s vlákny rozmístěnými horizontálně. Horizontální vlákna svým působením bránila deformaci vzorku do stran, proto vzorek vykázal vyšší smykovou odolnost. Naopak vzorek, kde byla všechna vlákna umístěna vertikálně, vykázal pokles smykové pevnosti i oproti nevyztužené zemině. Zde jsou všechna vlákna tlačena a vzhledem k jejich rozměrům dochází ke vzpěru vláken, která následně vybočí do strany a přispějí k rychlejšímu kolapsu celého vzorku. Kompromisem mezi těmito extrémy byly právě vzorky s náhodným rovnoměrným rozptýlením vláken.

## **4 METODY ZKOUŠENÍ ZEMINY VYZTUŽENÉ VLÁKNY**

Pro ověření vlastností nevyztužených zemin se běžně používají jak zkoušky v laboratoři, tak polní zkoušky. Když zjišťujeme vliv rozptýlené výztuže na inženýrské vlastnosti, nevystačíme si pouze s předpoklady určitého chování. Je nutné také provést testy, které nám naše předpoklady buď potvrdí, nebo vyvrátí. Na základě výsledků laboratorních zkoušek také můžeme vytvářet materiálové modely, se kterými následně budeme pracovat v některém z počítačových programů a dále s mnohem lepší přesností předpovídat parametry dalších vzorků, potažmo chování v reálném modelu v praxi. Proto je laboratorní zkoušení nedílnou součástí jakéhokoliv výzkumu zeminy a to nejenom té vyztužené rozptýlenými vlákny.

### **4.1 Specifika zkoušení vyztužené zeminy**

#### ***4.1.1 Srovnání výsledků zkoušek s nevyztuženou zeminou***

Zkoušení zeminy vyztužené vlákny má svá nedílná specifika, která ho významně odlišují od zkoušení zeminy nevyztužené. V první řadě je to nutnost provést testy v několika fázích. Protože je cílem těchto zkoušek zjistit vliv vyztužení na vlastnosti zeminy, je nezbytné zjistit nejprve jak se chová tato zemina bez vyztužení, abychom měli naměřené výsledky s čím porovnat. Pro porovnání dále musíme znát další významné faktory. Patří mezi ně všechny vlastnosti vláken uvedené v kapitole 3, dále ještě relativní ulehlost, vlhkost vzorku a metoda mísení vláken se zeminou.

#### ***4.1.2 Příprava laboratorních vzorků***

Pro zkoušení zeminy v laboratoři je obvyklé použití tzv. neporušených vzorků. Jak již název napovídá, budou vzorky zkoušeny přesně v takovém stavu, v jakém byly uloženy v terénu. Někdy bývá vyjmutí zeminy z prostředí a dopravení až do laboratoře, aniž by došlo k porušení, velmi obtížnou úlohou. Z tohoto důvodu se také výzkum soustředí na zkoušení tzv. rekonstituovaných vzorků, tedy vzorků, které byly připraveny z již porušené zeminy a dále smíseny s vodou. Z této hmoty se pak konzolidací připravují rekonstituované vzorky.

Při zkoušení vyztužených zemin neporušenost vzorku neřešíme. Nebylo by to ani technicky možné, neboť nějak musí dojít ke vmísení vláken do zeminy. Pro použití v praxi by byl použit podobný způsob, tedy porušování zeminy a její mísení s vlákny, následné hutnění do požadované ulehlosti. Z těchto důvodů klademe při přípravě vzorku pro zkoušení důraz na správné a rovnoměrné smísení vláken se zeminou.

Pro zajištění zpracovatelnosti a zhutnitelnosti je nezbytné do zeminy přidat záměrně vlhkost. Tato vlhkost však může být v některých typech zkoušek nežádoucí a je proto vhodné vzorek po zpracování do požadovaného tvaru a ulehlosti vysušit. Při výrobě zkušebního vzorku je třeba dbát, aby nedošlo k poškození vláken. Zejména při hutnění by se mohla vlákna snadno ohnout nebo i porušit, což by mohlo mít za následek významné zkreslení výsledků.

#### ***4.1.3 Rozměry těles***

Dalším specifikem jsou obecně větší rozměry zkušebních těles. Tento rozdíl je způsoben rozměrem vláken. Pro srovnání uvedeme válcovité těleso pro triaxiální zkoušku, jehož průměr je pro jílů běžně 38 mm. Zrna jílu jsou však specifikována velikostí do 0,002 mm, z tohoto důvodu je průměr zkušebního tělesa 38 mm dostačující. Těžko si však můžeme představit, že bychom dokázali vyrobit takto velké těleso pro triaxiální zkoušku z písku, který je typickou zeminou pro vyztužování, navíc s obsahem vláken o délce 50 mm. Samozřejmě, že technologicky by toto provést šlo, ale vypovídající hodnota zkoušky na takovém vzorku by byla velmi nízká, ne-li nulová. Z těchto důvodů je běžné používání těles větších rozměrů, jejichž průměr je nejméně dvojnásobek délky vlákna.

#### ***4.1.4 Typy zkoušek prováděných na vyztužené zemině***

Na dalších stránkách budou popsány jednotlivé typy zkoušek prováděných na vyztužených zeminách. Konkrétně se jedná o:

- Triaxiální smykovou zkoušku
- Přímou smykovou zkoušku
- Zkoušku vytržení vláken

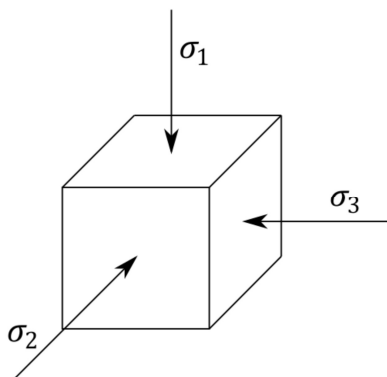


## 4.2 Triaxiální smyková zkouška

Triaxiální zkouška je ve studiích zabývajících se tématem zeminy vyztužené rozptýlenými vlákny velmi rozšířená. Nabízí v podstatě komplexní zhodnocení vlivu vyztuže na chování zeminy. Její nevýhodou je ovšem vysoká pořizovací cena přístroje s triaxiální komorou. Zkouší se vzorky válcovitého tvaru, u vyztužené zeminy větších průměrů. Vždy jde o srovnání výsledků vyztužené a nevyztužené zeminy za stejných ostatních podmínek.

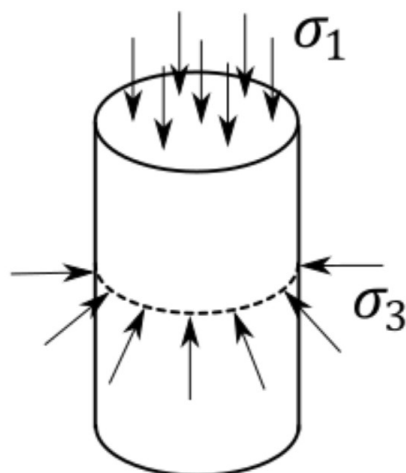
### 4.2.1 Obecně o triaxiální smykové zkoušce

Zkouška prováděná v triaxiálním smykovém přístroji se provádí za účelem zjištění smykových vlastností materiálu. Pokud mluvíme o pravém triaxiálním přístroji, dochází v něm k vyvíjení napětí na vzorek ve třech osách, kde napětí  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  a  $\sigma_3$  jsou obecně různá (Obr. 4-1).



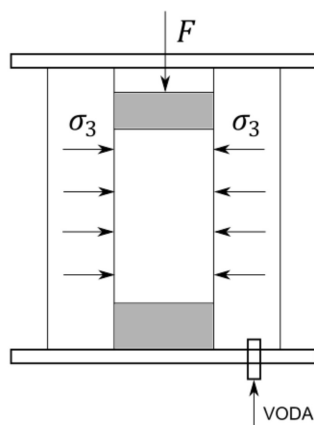
Obr. 4-1 Triaxiální zkoušení vzorku

Této podmínky se ovšem dosahuje poměrně těžko, proto je obvyklé použití tzv. nepravého triaxiálního přístroje.



*Obr. 4-2 Nepravý triaxiální způsob zkoušení*

Napětí  $\sigma_1$  je vyvozováno na válcový vzorek na horní podstavu, na plášť tohoto válce působí ve všech směrech napětí  $\sigma_3$ , které se rovná napětí  $\sigma_2$ . Neporušený vzorek zeminy tvaru válce se vloží do komory syčené vodou. Pro zabránění pronikání sytící vody do vzorku je použita elastická membrána.



*Obr. 4-3 Schéma triaxiální komory*

Vzorek je pak zatěžován napětím  $\sigma_3$  vyvozeným tlakem vody. Na horní podstavu dále můžeme nechat působit sílu  $F$ , která nám na ploše podstavy vyvodí přetížení, které po sečtení se  $\sigma_3$  dle (4-31) vyčíslíme jako  $\sigma_1$ . Deviator napětí je potom rozdíl  $\sigma_1$  a  $\sigma_3$ , tedy právě přetížení způsobené silou  $F$  na plochu  $A$  (4-32).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{F}{A} \quad (4-31)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{F}{A} \quad (4-32)$$

Zkouška se provádí smýkáním různých vzorků stejné zeminy při různých komorových tlacích  $\sigma_3$  se zvyšováním normálových napětí  $\sigma_1$  až do porušení vzorku. Napětí  $\sigma_1$  při kterém k tomu dojde se zaznamená. Následně se tato napětí zanesou do grafu  $\sigma - \tau$  a sestaví se přímka porušení, ze které lze odečíst úhel vnitřního tření  $\varphi$  a soudržnost  $c$ .

#### 4.2.2 Triaxiální zkoušky na vyztužené a nevyztužené zemině

Na základě výsledků triaxiálních zkoušek lze vyjádřit vliv vyztužení na smykovou pevnost vzorku. Pro tyto účely se používá faktor zlepšení deviátoru napětí  $I_d$  jehož výpočet vyjadřuje (4-33).

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{fU}} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_R - (\sigma_1 - \sigma_3)_{fU}}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{fU}} \\ &= \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_R}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{fU}} - 1 \end{aligned} \quad (4-33)$$

Kde  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{fU}$  je deviátor napětí při porušení nevyztuženého vzorku,  $(\sigma_1 - \sigma_3)_R$  deviátor napětí vyztuženého vzorku v závislosti na poměrném přetvoření  $\varepsilon$ . Rovnice (4-33) lze použít pro jakýkoliv bod křivky až do bodu porušení, tedy pro jakékoliv přetvoření. Nahrazením  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{fR}$  (deviátor napětí při porušení vyztužené zeminy) za  $(\sigma_1 - \sigma_3)_R$  získáme vzorec pro výpočet faktoru zlepšení deviátoru napětí při porušení  $I_{df}$  (4-34).

$$I_{df} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{fR}}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{fU}} - 1 \quad (4-34)$$

Obě tyto veličiny se běžně udávají v procentech, popřípadě bezrozměrně a vyjadřují míru zlepšení vyztužené zeminy oproti té nevyztužené.

Zlepšení smykové pevnosti zeminy jako výsledek příspěvku vláken lze také vyjádřit jako poměr deviátorového napětí ( $DSR$ ) nebo obdobně jako v předchozím případě poměr deviátorového napětí při porušení ( $DSR_f$ ).

$$DSR = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_R}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{fU}} \quad (4-35)$$

$$DSR_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{fR}}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{fU}} \quad (4-36)$$

Dalším možným parametrem získaným z triaxiálních zkoušek je index křehkosti značený v literatuře (Maher a Ho 1993, Consoli a kol. 1998a, Consoli a kol. 2002)  $I_b$ .

$$\begin{aligned} I_b &= \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{peak} - (\sigma_1 - \sigma_3)_{ultimate}}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ultimate}} \\ &= \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{peak}}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ultimate}} - 1 \end{aligned} \quad (4-37)$$

Kde  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{peak}$  je vrcholový deviátor napětí a  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ultimate}$  je konečný deviátor napětí. Nižší hodnota  $I_b$  značí omezenou ztrátu povrchové pevnosti při triaxiální kompresi a tedy zemina vyztužená vlákny se chová jako duktilní materiál.

#### 4.2.3 Triaxiální zkoušky v předchozích studiích

- Li a Zornberg (2013)

Li a Zornberg (2013) prováděli triaxiální smykovou zkoušku na zemině vyztužené polypropylenovými vlákny o délce 25 a 50 mm. Zemina byla popsána jako špatně zrněný písek (SP dle USCS). Z triaxiálních zkoušek na nevyztužené zemině byla zjištěna koheze 6,1 kPa a úhel vnitřního tření 34,3°. Vzorky měly průměr 71 mm a výšku 142 mm, vlákna tvořila hmotnostní podíly 0,2 a 0,4 %. Testy byly prováděny jako CD – konzolidované,

odvodněné s relativní ulehlostí 55 %. Vzorky byly zkoušeny za komorového tlaku 35, 70 a 140 kPa.

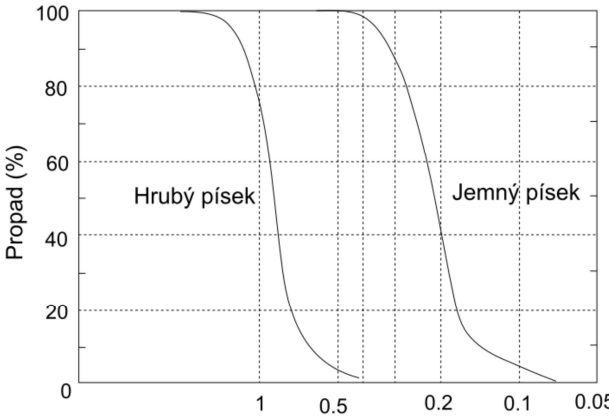
V další části své práce provedli Li a Zornberg (2013) triaxiální zkoušky na velkorozměrových vzorcích jiné zeminy o ulehlostech 48 a 65 %. Zemina byla popsána jako stejnoměrně zrnitý písek se zaoblenými zrny. Průměr zrna při 50 % propadu byl 0,4 mm. Vlastnosti zeminy zjištěné z triaxiální zkoušky při obou testovaných relativních ulehlostech jsou popsány v tabulce (Tab. 4-1). Rozměry testovaných vzorků byly 152 mm v průměru a výška 304 mm. Zde byla použita pouze vlákna o délce 50 mm a hmotnostní podíly 0,1, 0,2, 0,3 a 0,4 %. Komorové tlaky byly 60, 115 a 210 kPa. Při zkoušení vyztužené zeminy popsali při relativní ulehlosti zeminy 65 % zvýšení duktility s vyšším množstvím vláken. Dále byla zjištěna závislost mezi smykovou pevností a množstvím vláken – přímá úměrnost. K mobilizaci napětí ve vláknech dochází až při vyšších namáháních, tedy příspěvek vláken ke zvýšení smykové pevnosti není příliš velký při malých komorových tlacích. Také dochází s přidávkou vláken k vyšším přetvořením před kolapsem.

*Tab. 4-1 Parametry zeminy pro triaxiální zkoušku (Li a Zornberg 2013)*

Parametr	Hodnota	
Relativní ulehlost $I_d$ [%]	48	65
Suchá objemová tíha $[\text{kN/m}^3]$	15,54	15,91
Úhel vnitřního tření $\phi'$ $[\circ]$	3,6	35,2
Koheze $c'$ [kPa]	0	0

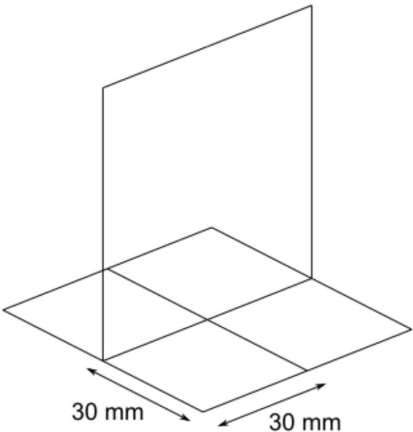
- Michalowski a Čermák (2003)

Michalowski a Čermák (2003) se ve své práci také zabývali pozorováním chování vzorků při triaxiální zkoušce. Pro testování použili dva typy zeminy – jemný písek a hrubý písek (SW). Ilustrativní průběhy jednotlivých křivek zrnitosti jsou znázorněny na Obr. 4-4. Pro vyjádření podílu vláken ve vzorku byl použit objemový podíl, zde konkrétně 0,25 až 2,0 %. Tělesa pro zkoušení v triaxiální komoře měla rozměry 94,5 mm – jak průměr, tak výšku. V tomto případě jde o poněkud netypické rozměry zkušebního válcovitého tělesa, protože se obvykle volí výška jako dvojnásobek průměru. Vyztužená zemina byla hutněna na relativní ulehlost 70 %.



Obr. 4-4 Znáznornění křivek zrnitosti zeminy použité pro triaxiální zkoušky (Michalowski a Čermák 2003)

Při přípravě vzorku je nutné dbát na rovnoměrné rozložení vláken v celém jeho objemu. Vlákná dále musí mít orientaci do všech směrů, čehož není jednoduché dosáhnout vzhledem k tendenci vláken zůstat při mísení se suchým pískem v horizontální poloze nebo k poloze velmi blízké horizontální. Pro tyto účely byla zhotovena pomůcka zajišťující přeorientování vláken před samotným vibračním zhutňováním. Jedná se o drátěnou mřížku s otvory o rozměrech 30x30 mm – náčrt této pomůcky je zobrazen na Obr. 4-5.



*Obr. 4-5 Nákres drátěné pomůcky pro zajištění správné orientace vláken ve vzorku  
(Michalowski a Čermák 2003)*

Postup přípravy laboratorního vzorku pro triaxiální zkoušku (Michalowski a Zhao 1996):

- Písek a vlákna určená pro jeden vzorek se rozdělí na 15 stejných dílů.
- Drátěná pomůcka se umístí na dno formy a pokryje se tenkou vrstvou písku.
- Jako další vrstva se rozprostře rovnoměrně jedna porce vláken a následně se zakryje jednou porcí písku. Tento postup je opakován pro další dvě vrstvy vláken a písku.
- Mřížka se pomalu vytáhne skrz připravenou pětinu vzorku, čímž zapříčiní změnu orientace vláken. Takto rozptýlená vlákna s různorodou orientací zajistí, že nevznikne předem určená plocha, po které může dojít k usmýknutí.
- První pětina vzorku se takto umístí na vibrační stůl, kde je jemně vibrována až do dosažení požadované ulehlosti.
- Třetí až pátý krok se opakuje znovu ještě pro další čtyři vrstvy.

Při podílu výztuže 2 % (objemově) došlo ke zvýšení smykové pevnosti až o 70 %, zatímco při podílu 0,5 % došlo ke zvýšení pouze o 20 %. Při vyztužování jemného písku byl efekt vláken markantnější v případě, že se jednalo o malou koncentraci vláken (0,5 %). Naopak při vyztužování hrubého písku byl vyšší efekt pozorován při větší koncentraci vláken (2 %). Poněkud překvapující byla hodnota tření mezi vláknem a zrny zeminy, neboť zde nebyl žádný rozdíl mezi hrubým a jemným pískem.

- Maji, Sowmiyaa a Robinson (2016)

Maji, Sowmiyaa a Robinson (2016) prováděli také triaxiální smykové zkoušky. Na rozdíl od předchozích dvou uvedených prací však neprováděli zkoušky na zemině vyztužené rozptýlenými vlákny, ale používali geomříže a geotextilie. Vyztužovaná zemina byla klasifikována jako špatně zrněný říční písek (SP). Zkoušená tělesa měla tvar válce s průměrem 100 mm a výškou 200 mm. Testy byly prováděny jak na nevyztužené, tak na vyztužené zemině, s relativní ulehlostí 60 až 80 % a komorovým tlakem 50 až 200 kPa.

Používané výztužné prvky v této práci byly:

- Šedá mřížka (GM) o síle 0,2 mm a s velikostí oka 1,5 mm
- Žlutá mřížka (YM) o síle 0,3 mm a s velikostí oka 1,5 mm
- Rybářská síť (FN) o síle 1 mm a s velikostí oka 25 mm

- Tkaná geotextilie (WGT) o síle 1 mm a s neurčenou velikostí oka

Vyztužená zemina vykazala zvýšení vrcholové smykové pevnosti a osovou deformaci před kolapsem. Dále došlo ke zvýšení duktility.

- Michalowski a Čermák (2002)

V této své dřívější práci Michalowski a Čermák (2002) prováděli také triaxiální zkoušky. Na rozdíl od své pozdější práce však experimentovali s různou orientací jednotlivých vláken ve vzorku. Zkoušky zahrnovaly objemový podíl vláken ve vzorku 0,25 % v jemných pískách a 2,0 % v hrubých pískách. Ve třech sériích testů byl zkoumán vliv orientace vláken – náhodně rovnoměrně rozmístěná vlákna, všechna vlákna horizontálně ve vrstvách a všechna vlákna vertikálně ve vrstvách.

V případě náhodného rozmístění vláken byl při přípravě vzorku použit stejný postup jako v práci Michalowski a Čermák (2003), převzatý z Michalowski a Zhao (1996), popsany výše. Vzorky se všemi vlákny horizontálně byly připravovány ručním rozmístěním jednotlivých vláken radiálně do vrstev. Vzorky s vertikálními vlákny byly také připravovány ručně. Zkoušky byly iniciovány jako odvodněné, s izotropním nárůstem komorového tlaku až na 400 kPa.

Při zkoušení bylo zjištěno, že tlačena vlákna nijak nepůsobí na zlepšení parametrů zemin. Srovnání výsledků zkoušek vzorků s různou orientací vláken nabízí Tab. 4-6 až Tab. 4-9.

- Li a Zornberg (2003)

Tato práce je unikátní použitím nejenom nesoudržných zemin jako jsou písky, ale také soudržných zemin jako jsou jíly. Pro vyztužování byla použita polypropylenová vlákna o délkách 25 a 51 mm. Triaxiální smykové zkoušky byly prováděny v režimu CD – konzolidované, odvodněné – pro nesoudržnou zeminu, a v režimu CU – konzolidované, neodvodněné – pro soudržnou zeminu. Vzorky byly válcovitého tvaru, s průměrem 71 mm a výškou minimálně 142 mm (minimálně dvojnásobek průměru). Nesoudržná zemina byla zaříděna jako písek (SP), s kohezi 6,1 kPa a úhlem vnitřního tření 34,3°. Výztuž zaujímala až 0,4 % suché váhy a testování proběhlo při komorovém tlaku 70 kPa. Soudržná zemina byla jíl (CL), s kohezi 12,0 kPa a úhlem vnitřního tření 31,0°. Jíl byl



zhutněn při optimální vlhkosti na 90 % Proctor standard a testován při komorovém tlaku 98 kPa. Po celou dobu zkoušky byly měřeny pórové tlaky.

Z této práce vyplynulo, že čím delší jsou použita vlákna, tím se zvyšuje i jejich odolnost proti vytržení a z toho vyplývá i zvýšení tahového napětí indukovaného ve vláknech. Také bylo zjištěno, že použití vláken o délce 50 mm s koncentrací 0,2 % zajišťuje srovnatelné výsledky jako použití vláken délky 25 mm a koncentraci 0,4 %. Vzorky vyztužené vlákny dosáhly stejné nebo i vyšší vrcholové pevnosti již při nižších komorových tlacích.

- Zornberg (2002)

Z práce Zorberga (2002) vzešel jeden z používaných materiálových modelů. Podkladem pro něj byla série triaxiálních zkoušek provedených na různých zeminách s rozptýlenou výztuží. Použitá vlákna byla propylenová, s délkou 25 a 50 mm, průměrem 0,62 a 0,23 mm. Vzorky byly připraveny s hmotnostním podílem 0,2 % a 0,4 %. Po mísení zeminy s vlákny byla směs hutněna na 90 % maximální ulehlosti ( $13,9 \text{ kN/m}^3$ ). Vzorky pro zkoušení v triaxiální komoře měly průměr 71 mm, výška byla minimálně dvojnásobek průměru. Komorový tlak měl pro různé zkoušky různé hodnoty: 24, 48 a 96 kPa. Na základě materiálového modelu byl provedena predikce výsledků (Tab. 2-1 a Tab. 2-2), které byly následně porovnány s reálnými výsledky triaxiálních zkoušek. Celkově bylo dosaženo dobré shody předpokládaných a experimentálně zjištěných hodnot.

- Consoli, Casagrande, Prietto a Thomé (2003)

V této práci byl vyztužovanou zeminou písek s příměsí jílu s nízkou plasticitou, vlákna byla polypropylenová o délce 24 mm a průměru 0,023 mm. Vzorky pro zkoušení v triaxiální komoře byly připraveny ručním mícháním zeminy s vlákny a vodou. Podíl vláken byl 0,5 % (hmotnostně) a vlhkost 16 % (suché váhy zeminy). Zkušební tělesa měla průměr 50 mm a výšku 100 mm, po vyrobení byla uložena při vlhkém prostředí. Pro komorový tlak byly použity hodnoty 20, 60, 100 a 200 kPa. Z naměřených dat vyplývá, že úhel vnitřního tření bývá přidáním rozptýlené výztuže ovlivněn pouze málo (změna z  $30^\circ$  na  $31^\circ$ ), avšak výraznou změnu vykazuje koheze (z 23 na 127 kPa). Nespornou výhodou zeminy vyztužené rozptýlenými vlákny je její chování při velkých přetvořeních, proto nabízí slibnou variantu zlepšení zeminy při mělkém zakládání, násypech na

měkkých základových půdách a jiných geotechnických problémech zahrnujících velké deformace.

- Moradi, Hamidi a Tevakoli Mehrjardi (2013)

V této práci byly provedeny konzolidované, odvodněné triaxiální smykové zkoušky. Jako zemina byl použit čistý suchý plážový písek (SP), dále do něj byla přidávána složka kaolinického jílu v různých poměrech (10 % a 20 %) a polypropylenová vlákna, kruhovitého průřezu (délka 12 mm, průměr 0,023 mm). Obsah vláken byl 0,5 % a 1,0 % suché váhy zeminy. Pro zajištění zpracovatelnosti a mísitelnosti složek byla přidána i voda v množství 5 % suché váhy zeminy. Zkušební tělesa byla připravována do formy o průměru 100 mm a výšce 200 mm po vrstvách o tloušťce 25 mm. Připravená, ručně zamíchaná směs zemin, vláken a vody byla vrstvena do formy a následně kovovým kladivem hutněna až do dosažení požadované tloušťky vrstvy 25 mm. Sada vzorků byla provedena v relativní ulehlosti 50 % a část 90 % a následně zkoušena v triaxiálním přístroji při komorových tlacích 100, 200 a 300 kPa. Při zkoušení byly vzorky satureované a maximální rychlost zatěžování se rovnala 0,2 mm/min. Celkem bylo v této studii provedeno 54 triaxiálních smykových zkoušek.

V této studii byla na vyztužené zemině pozorována duktilita a nebylo zaznamenáno vrcholové chování. Porušení bylo dosaženo při maximálním přetvoření 20 %. Také se materiál již nechoval dilatantně, nýbrž došlo k nárůstu kontraktance.

- Srovnání postupů provádění triaxiálních smykových zkoušek

Tab. 4-2 nabízí srovnání některých parametrů triaxiálních smykových zkoušek prováděných v různých pracích, jako jsou relativní ulehlost  $I_d$ , délka vlákna  $L_f$ , podíl vláken  $\chi$ , průměr vzorku  $d$ , výška vzorku  $v$ , komorový tlak  $\sigma_3$ .

Tab. 4-2 Srovnání parametrů triaxiálních smykových zkoušek v předchozích studiích

Typ zkoušky	Zemina	$I_d$ [%]	$L_f$ [mm]	$\chi$ [%]	$d$ [mm]	$v$ [mm]	$\sigma_3$ [kPa]	Zdroj
CD	špatně zrněný písek	55	25 a 50	0,2 a 0,4	71	142	35-140	Li a Zornberg (2013)
CD, suchý vzorek	dobře zrněný písek	48 a 65	50	0,1 až 0,4	152	304	60-210	Li a Zornberg (2013)
CD	jemný a hrubý písek	70	25,4	0,25-2,0	94,5	94,5	100-600	Michalowski a Čermák (2003)
CD	špatně zrněný písek	60 až 80	-	-	-	-	50-200	Maji, Sowmiya a Robinson (2016)
CD	jemný a hrubý písek	-	25,4	0,25 a 2,0	94,5	94,5	až 400	Michalowski a Čermák (2002)
CD	písek	-	25 a 51	0,2-0,4	71	min. 142	70 a 140	Li a Zornberg (2003)
CU	jíl	-	25 a 51	0,2-0,4	71	min. 142	98-116	Li a Zornberg (2003)
CD	jíl	-	25 a 50	0,2-0,4	71	min. 142	24-96	Zornberg (2002)
CD	špatně zrněný písek	-	25 a 50	0,2-0,4	72	min. 142	24-96	Zornberg (2002)
CD	jílovitý písek	-	24	0,5	50	100	20-200	Consoli a kol. (2003)
CD	písek + příměs jílu	50, 90	12	0,023	100	200	100-300	Hamidi a kol. (2013)

#### 4.2.4 Vliv vyztužení na výsledky triaxiální smykové zkoušky v předchozích studiích

Tab. 4-3 Vliv množství vyztuže na parametry zlepšení, polymerní vlákna

$\chi$ [%]	$\sigma_3'$ [kPa]	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{fR}$ [kPa]	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{fU}$ [kPa]	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{peak}$ [kPa]	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ultimate}$ [kPa]	$I_{df}$	DSR <sub>f</sub>	$I_b$	Zdroj
0,1(w)	210	550	410	600	550	0,34	1,34	0,09	Li a Zornberg (2013)
0,2(w)	210	720	410	720	720	0,76	1,76	0,00	Li a Zornberg (2013)
0,3(w)	210	780	410	790	780	0,90	1,90	0,01	Li a Zornberg (2013)
0,4(w)	210	910	410	910	910	1,22	2,22	0,00	Li a Zornberg (2013)

V Tab. 4-3 můžeme pozorovat vliv množství výztuže na parametry zlepšení při triaxiální smykové zkoušce. Jedná se o polymerní vlákna (délky 50 mm) a podíl vláken je měřen hmotnostně. Při stejném komorovém tlaku (210 kPa) a různých podílech vláken v kompozitu se mění i parametry zlepšení, konkrétně se postupně zvyšují úměrně k podílu vláken. Nejvyšších parametrů zlepšení bylo při těchto hodnotách dosaženo při 0,4 % hmotnostního podílu.

*Tab. 4-4 Vliv komorového tlaku na parametry zlepšení, polymerní vlákna*

$\chi$ [%]	$\sigma_3'$ [kPa]	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{IR}$ [kPa]	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{IU}$ [kPa]	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{peak}$ [kPa]	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ultimate}$ [kPa]	$I_{df}$	DSRf	Ib	Zdroj
0,5(V)	100	450	300	460	450	0,50	1,50	0,02	Michalowski a Čermák (2003)
0,5(V)	200	750	600	800	750	0,25	1,25	0,07	Michalowski a Čermák (2003)
0,5(V)	300	1050	900	1100	1050	0,17	1,17	0,05	Michalowski a Čermák (2003)
0,5(V)	400	1400	1250	1450	1400	0,12	1,12	0,04	Michalowski a Čermák (2003)
2,0(V)	50	400	150	400	400	1,67	2,67	0,00	Michalowski a Čermák (2003)
2,0(V)	100	600	300	650	600	1,00	2,00	0,08	Michalowski a Čermák (2003)
2,0(V)	200	1100	600	1100	1100	0,83	1,83	0,00	Michalowski a Čermák (2003)
2,0(V)	300	1500	900	1500	1500	0,67	1,67	0,00	Michalowski a Čermák (2003)
2,0(V)	400	1900	1250	1900	1900	0,52	1,52	0,00	Michalowski a Čermák (2003)

V Tab. 4-4 můžeme pozorovat vliv komorového tlaku na parametry zlepšení při triaxiální zkoušce. Jedná se o polymerní vlákna (délky 25,4 mm = 1 palec, průměr vláken 0,3 mm) a podíl vláken je měřen objemově. Při stejném podílu vláken (0,5 % a 2,0 %) a zvyšování komorových tlaků vidíme, že parametry zlepšení klesají. Nejvyšších hodnot parametrů zlepšení tedy dosahují vzorky při malých komorových tlacích.

Tab. 4-5 Vliv množství výztuže na parametry zlepšení, polymerní vlákna

$\chi$ [%]	$\sigma_3'$ [kPa]	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{IR}$ [kPa]	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{IU}$ [kPa]	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{peak}$ [kPa]	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ultimate}$ [kPa]	$I_{df}$	$DSR_f$	$I_b$	Zdroj
0,5(V)	200	750	620	800	750	0,21	1,21	0,07	Michalowski a Čermák (2003)
1,5(V)	200	950	620	970	950	0,53	1,53	0,02	Michalowski a Čermák (2003)
2,0(V)	200	1100	620	1120	1100	0,77	1,77	0,02	Michalowski a Čermák (2003)

V Tab. 4-5 můžeme pozorovat vliv množství výztuže na parametry zlepšení při triaxiální zkoušce. Jedná se o polymerní vlákna (délky 50 mm, průměr 0,3 mm) a podíl vláken je (na rozdíl od Tab. 4-3) měřen objemově. Při stejném komorovém tlaku (20 kPa) a různých podílech vláken v kompozitu se mění i parametry zlepšení, konkrétně se postupně zvyšují úměrně k podílu vláken. Nejvyšších parametrů zlepšení bylo při těchto hodnotách dosaženo při 2,0 % objemového podílu.

V Tab. 4-3 až Tab. 4-5 můžeme vidět, jaký vliv má množství výztuže a způsob zatěžování na velikost parametrů zlepšení. Platí, že čím vyšší jsou parametry  $I_{df}$  a  $DSR_f$ , tím je efekt vyztužení větší. Naopak je vhodné, aby hodnota  $I_b$  byla co nejnižší. Nemalou roli hraje velikost komorového tlaku, při kterém je vzorek v triaxiální komoře smýkán. Vždy je třeba brát v úvahu, v jakých oborech napětí bude zemina vyztužená vlákny namáhána v případném využití v reálné konstrukci, a podle toho volit správný způsob zatěžování. Dále je v tabulkách (Tab. 4-3 až Tab. 4-5) dobře vidět, jak ovlivňuje porovnávání výsledků zkoušek existence různých způsobů určování podílu vláken. Tato skutečnost je zde vyznačena ve sloupci  $\chi$ , vedle hodnot podílu a to (w) pro hmotnostní poměr a (V) pro objemový podíl. Z porovnání způsobu zatěžování a dosažených výsledků můžeme vyčíst, že v Tab. 4-3 a v Tab. 4-5 mají srovnatelné výsledky zkoušky s hmotnostním podílem 0,3 % a objemovým podílem 2,0 %. Vliv ovšem také mohou hrát vlastnosti zeminy, její ulehlost a jiné další okolnosti zkoušení.

Tab. 4-6 Vliv orientace vláken na parametry zlepšení, jemný písek, materiál: polyamid - zdroj: Michalowski a Čermák (2002)

$\chi$ [%]	orientace	$\sigma_3'$ [kPa]	$(\sigma_1-\sigma_3)_{IR}$ [kPa]	$(\sigma_1-\sigma_3)_{IU}$ [kPa]	$(\sigma_1-\sigma_3)_{peak}$ [kPa]	$(\sigma_1-\sigma_3)_{ultimate}$ [kPa]	$I_{df}$	$DSR_f$	$I_b$
0,25(V)	horizontální	400	1350	1250	1480	1350	0,08	1,08	0,10
0,25(V)	vertikální	400	1250	1250	1290	1250	0,00	1,00	0,03
0,25(V)	náhodná	400	1270	1250	1340	1270	0,02	1,02	0,06

V Tab. 4-6 vidíme, jakým způsobem ovlivňuje orientace vláken výsledky parametrů zlepšení vyztužené zeminy. Při vertikální poloze vláken nedochází k žádnému zlepšení oproti nevyztužené zemině. Naopak nejvyšší hodnoty zlepšení pozorujeme u horizontální orientace. Nepříjemným efektem je na druhou stranu nejvyšší hodnota indexu křehkosti, který je pro nás nežádoucí. Náhodná orientace vláken není zdaleka tak účinná, jako horizontální, ale její nespornou výhodou je, že je velmi snadno dosažitelná a přesto nabízí určité zlepšení oproti zemině nevyztužené.

Tab. 4-7 Vliv orientace vláken na parametry zlepšení, jemný písek, materiál: ocel - zdroj: Michalowski a Čermák (2002)

$\chi$ [%]	orientace	$\sigma_3'$	$(\sigma_1-\sigma_3)_{IR}$	$(\sigma_1-\sigma_3)_{IU}$	$(\sigma_1-\sigma_3)_{peak}$	$(\sigma_1-\sigma_3)_{ultimate}$	$I_{df}$	$DSR_f$	$I_b$
0,25(V)	horizontální	400	1720	1250	1760	1720	0,38	1,38	0,02
0,25(V)	vertikální	400	1250	1250	1300	1250	0,00	1,00	0,04
0,25(V)	náhodná	400	1300	1250	1370	1300	0,04	1,04	0,05

V Tab. 4-7 můžeme pozorovat stejný trend jako v Tab. 4-6, tedy nejvyšší parametr  $I_{df}$  a  $DSR_f$  pro horizontální orientaci. Zde pro ocelová vlákna je zlepšení dokonce vyšší než pro polypropylenová (Tab. 4-6). Zajímavý je také fakt, že při horizontální orientaci je zároveň nejnižší index křehkosti, tedy nejpriznivější parametry ve všech ohledech. Nejvyšší index křehkosti má v tomto případě náhodná orientace vláken.

Tab. 4-8 Vliv orientace vláken na parametry zlepšení, hrubý písek, materiál: polyamid - zdroj: Michalowski a Čermák (2002)

$\chi$ [%]	orientace	$\sigma_3'$	$(\sigma_1-\sigma_3)_{IR}$	$(\sigma_1-\sigma_3)_{IU}$	$(\sigma_1-\sigma_3)_{peak}$	$(\sigma_1-\sigma_3)_{ultimate}$	$I_{df}$	$DSR_f$	$I_b$
0,25(V)	horizontální	400	1525	1350	1550	1525	0,13	1,13	0,02
0,25(V)	vertikální	400	1350	1350	1375	1350	0,00	1,00	0,02
0,25(V)	náhodná	400	1450	1350	1450	1450	0,07	1,07	0,00

Tab. 4-9 Vliv orientace vláken na parametry zlepšení, hrubý písek, materiál: ocel - zdroj: Michalowski a Čermák (2002)

$\chi$ [%]	orientace	$\sigma_3'$	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{FR}$	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{FU}$	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{peak}$	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ultimate}$	$I_{df}$	DSRf	Ib
0,25(V)	horizontální	400	1650	1350	1660	1650	0,22	1,22	0,01
0,25(V)	vertikální	400	1450	1350	1460	1450	0,07	1,07	0,01
0,25(V)	náhodná	400	1400	1350	1450	1400	0,04	1,04	0,04

V Tab. 4-8 a Tab. 4-9 vidíme hodnoty parametrů zlepšení pro hrubý písek jakožto vyztužovanou zeminu (na rozdíl od Tab. 4-6 a Tab. 4-7, kde je vyztužovaná zemina jemný písek). V hrubém písku můžeme pozorovat stejný trend jako při zkouškách na jemném písku. Rozdíl je však v konkrétních hodnotách. Zatímco polypropylenová vlákna nabízí lepší parametry zlepšení na hrubém písku oproti jemnému, tak ocelová vlákna to mají přesně naopak, tedy lepší efekt vyztužení na jemném písku oproti hrubému.

Vzhledem k použití velmi malého podílu výztuže (Tab. 4-6 až Tab. 4-9) jsou všechny parametry zlepšení o dost menší než v předcházejících případech (např. Tab. 4-3 až Tab. 4-5). Takto nízký podíl výztuže byl zvolen z důvodu proveditelnosti přípravy vzorků s určenou orientací.

Tab. 4-10 Vliv komorového tlaku na výsledky parametrů zlepšení, jílovitý písek – Consoli, Casagrande, Prietto a Thomé (2003)

$\chi$ [%]	$\sigma_3'$ [kPa]	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{FR}$ [kPa]	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{FU}$ [kPa]	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{peak}$ [kPa]	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ultimate}$ [kPa]	$I_{df}$	DSRf	Ib	Zdroj
0,5(w)	20	573	108	515,7	515,7	4,31	5,31	0,00	Consoli a kol. (2003)
0,5(w)	60	667	219,4	583,4	583,4	2,04	3,04	0,00	Consoli a kol. (2003)
0,5(w)	100	677	263,1	666,7	666,7	1,57	2,57	0,00	Consoli a kol. (2003)
0,5(w)	200	854	468,6	904,1	904,1	0,82	1,82	0,00	Consoli a kol. (2003)

V Tab. 4-10 můžeme vidět další příklad, jak ovlivňuje hodnotu parametrů zlepšení velikost komorového tlaku při triaxiální smykové zkoušce. V práci Consoli, Casagrande, Prietto a Thomé (2003) se jedná o vyztužení jílovitého písku polypropylenovými vlákny o délce 24 mm a průměru 0,023 mm, kde vlákna zaujímala podíl 0,5 % (hmotnostně).

Z pohledu stavebního inženýrství je pozitivní nulový index křehkosti, což znamená, že se materiál nechová vrcholově.

### **4.3 Translační krabicová smyková zkouška**

Další, neméně důležitou, zkouškou prováděnou na vyztužených zeminách je přímá smyková, nebo také translační krabicová smyková zkouška. Jedna z prvních studií zabývajících se zeminou vyztuženou rozptýlenými vlákny byla Gray a Ohashi (1983), která se zabývala vlivem orientace vláken na zvýšení smykové pevnosti. Tato práce byla založena právě na zkouškách vyztužené zeminy v přímém smyku.

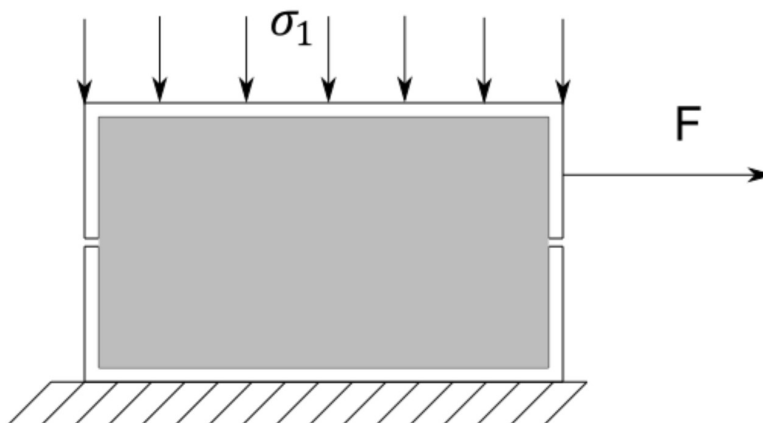
#### **4.3.1 Obecně o přímé smykové zkoušce**

##### *4.3.1.1 Translační krabicová smyková zkouška*

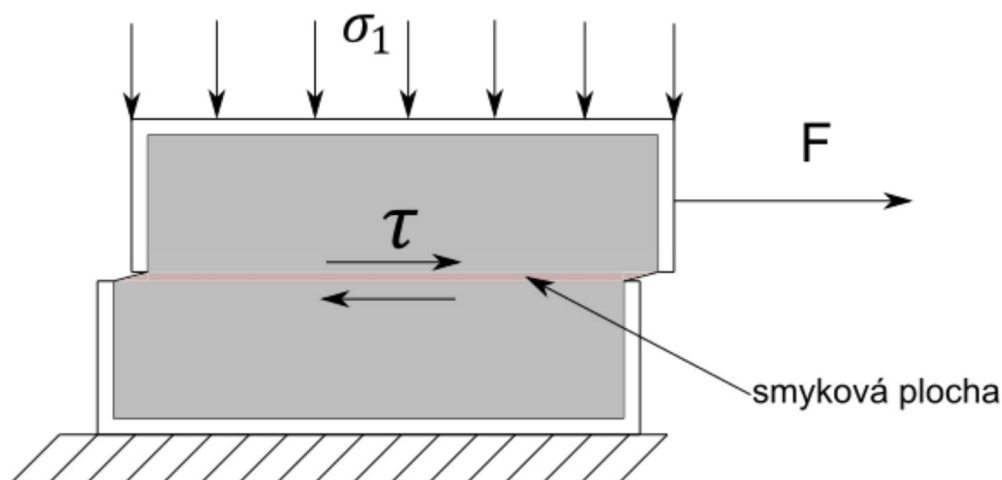
Zemina umístěná do smykového krabicového přístroje je zatěžována vertikálně normálovým napětím  $\sigma$  a horizontálním pohybem jednoho dílu krabice zatěžována smykem. Schéma krabicové smykové zkoušky je znázorněno na Obr. 4-6. Spodní polovina krabice se pohybuje, zatímco horní polovina stojí a je připojena k siloměru. Tímto pohybem vzniká smyková plocha, která je předem předurčená – musí být na styku horní a dolní části krabice (Obr. 4-7).

Zkouška ve smykovém krabicovém přístroji probíhá jako CD – konsolidovaná, odvodněná. Má tedy 2 fáze, nejdříve probíhá fáze konzolidace, která trvá cca 24 hodin, teprve následně může dojít ke smýkání. Pro správný průběh konzolidace a odvod vody je nezbytné umístit na horní i spodní povrch vzorku porézní destičky, které zůstávají přítomné i později při fázi smýkání.





Obr. 4-6 Vzorek umístěný do smykového krabicového přístroje při smýkání



Obr. 4-7 Vzorek v smykovém krabicovém přístroji po vzniku smykové plochy

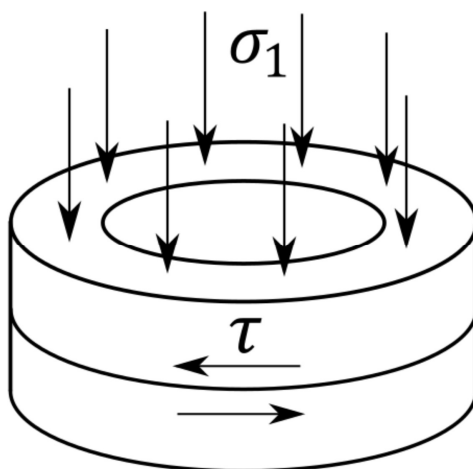
Nevýhodou této zkušební metody je nerovnoměrné rozdělení smykového přetvoření a existence předem předurčené smykové plochy. Maximální celkové posunutí by nemělo překročit 2 cm, v opačném případě je nutné zkoušku opakovat na jiném vzorku a aplikovat větší normálové přetížení. Pokud totiž dojde k příliš velkému posunu, dojde také k příliš velkému zmenšení styčné plochy. Tuto korekci plochy je nutné následně zahrnout do výpočtu, neboť zanedbání tohoto faktoru by vedlo k velké chybě při výpočtu působícího normálového napětí a výsledky by byly zkreslené.

V průběhu zkoušky by také neměl být měněn pórový tlak. Tuto skutečnost lze ovlivnit rychlostí smýkání, která může být pro písky větší, naopak například pro plastické jíly velmi malá, v řádech tisícín milimetru za minutu. Sledovanými údaji v průběhu zkoušky

jsou horizontální síla, horizontální posun, změna výšky vzorku, potažmo objemová změna vyčíslená ze změny výšky vzorku. Cílem krabicových smykových zkoušek je pak vyhodnotit vertikální napětí, průměrnou průřezovou plochu a smykové napětí.

#### 4.3.1.2 Rotační smyková zkouška

Rotační smykový přístroj je další přístroj pro provádění smykové zkoušky. Oproti krabicovému smykovému přístroji není omezen velikostí posunu, v podstatě se může otáčet i několikrát dokola. Smyková plocha je stále stejně velká, není tedy třeba uvažovat její změnu v průběhu zkoušky. Právě plocha smykové plochy je také nevýhodou tohoto způsobu zkoušení. Zatímco u krabicového smykového přístroje je plocha vždy obdélník, jehož hodnotu získáme prostým vynásobením délky a šířky, u kruhového smykového přístroje tvoří smykovou plochu mezikruží, což není pro výpočet příliš pohodlné. Dalším úskalím je měření posunu, protože blíže středu kruhu je posun menší než na okraji.



Obr. 4-8 Schéma kruhového smykového přístroje

#### 4.3.2 Přímá smyková zkouška na vyztužené a nevyztužené zemině

Na základě přímých smykových zkoušek lze vyjádřit podobně jako u triaxiální zkoušky vliv vyztužení na smykovou pevnost. Pro tyto účely se používá faktor zlepšení smykové pevnosti  $I_s$ .

$$I_s = \frac{\Delta\tau}{\tau_{fU}} = \frac{\tau_R - \tau_{fU}}{\tau_{fU}} = \frac{\tau_R}{\tau_{fU}} - 1 \quad (4-38)$$

Kde  $\tau_R$  je smyková pevnost vyztužené zeminy a  $\tau_{fU}$  smyková pevnost nevyztužené zeminy v závislosti na smykovém posunutí  $\delta$ . Faktor zlepšení smykové pevnosti  $I_s$  tedy vyjadřuje relativní přírůstek smykové pevnosti zeminy od příspěvku vláken a je běžně vyjádřen v procentech. Rovnici (4-38) je možné použít pro kterýkoliv bod zatěžovací křivky pro zjištění aktuálního faktoru zlepšení smykové pevnosti, za jakéhokoliv přetvoření až do bodu porušení. Pokud nahradíme  $\tau_R$  veličinou  $\tau_{fR}$ , tedy smykovou pevností při porušení, získáme vzorec pro výpočet  $I_{sf}$ , faktor zlepšení smykové pevnosti při porušení (4-39).

$$I_{sf} = \frac{\tau_{fR}}{\tau_{fU}} - 1 \quad (4-39)$$

Jak  $I_s$ , tak  $I_{sf}$  jsou bezrozměrné veličiny vyjadřující míru zlepšení vyztužené zeminy oproti nevyztužené a lze je vyjádřit v procentech.

Další parametry zlepšení používané u vyhodnocení triaxiálních zkoušek  $DSR$ ,  $DSR_f$  a  $I_b$ , ani jejich případné odvozené varianty se již u přímých smykových zkoušek nepoužívají. Dále platí, že čím vyšší hodnoty  $I_s$ , potažmo  $I_{sf}$ , tím větší je efekt rozptýlených vláken na chování zeminy, v tomto případě smykové pevnosti.

#### 4.3.3 Přímé smykové zkoušky v předchozích studiích

Krabicové smykové zkoušky byly jedny z prvních testů prováděných na vyztužených zeminách. Ve své době daly naprosto nové informace o možném potenciálu zeminy vyztužené rozptýlenými vlákny. První a zároveň nejkomplexnější soubor krabicových smykových zkoušek provedli Gray a Ohashi v 80. letech minulého století.

- Gray a Ohashi (1983)

Gray a Ohashi (1983) se ve své práci zaměřili na zkoumání vlivu různých materiálů, délek a orientace vláken, zkoušených v krabicovém smykovém přístroji. Při zkoušení používali

čistý plážový písek (SW – písek dobře zrněný) se střední velikostí zrna 0,23 mm a úhlem vnitřního tření (zjištěným z přímé smykové zkoušky) 39°.

Pro vyztužování použili vlákna s průměry 1-2 mm, s délkou 20-250 mm, ze čtyř různých materiálů: rákosí, polyvinylchlorid, palmyra a měď. Ke zkouškám byl použit krabicový smykový přístroj, vlákna byla vždy umístěna v pravidelném vzoru, se zhruba stejnými vzdálenostmi mezi jednotlivými vlákny a od kraje krabice. Vlákna byla umístěna jak kolmo, tak v určitém úhlu pro zjištění vlivu orientace vláken na smykovou pevnost.

Pro určení množství vláken byl použit plošný podíl, běžně 0,25 nebo 0,5 %, maximálně však 1,67 %. Normálová síla byla při zkoušení pro různé testy proměnná, nejvíce to bylo 144 kPa. Maximální horizontální posunutí bylo stanoveno na 5 mm.

Obecně s množstvím vláken stoupala i smyková pevnost vyztužené zeminy. Přítomnost vláken také omezila vertikální deformaci a dilatanci ulehleho písku. Nejlepších výsledků zvýšení smykové pevnosti dosáhla vlákna s odklonem 60° od smykové plochy. Dále nebylo pozorováno zvýšení tuhosti nebo modulu pružnosti s množstvím vláken.

- Eldesouky, Morsy a Mansour (2015)

Eldesouky, Morsy a Mansour (2015) se ve své práci zabývali objemovými změnami při zkoušení vyztužené zeminy. V rámci svého výzkumu prováděli také translační krabicové smykové zkoušky. Poměrně neobvyklé v tomto případě byly rozměry jednotlivých vláken. Polypropylenová vlákna měla délku pouze 6 mm a průměr 0,05 mm.

Pro výrobu vzorků byl použit hmotnostní podíl vláken v kompozitu (zde konkrétně 0,5 % a 1,0 %). Množství vláken bylo váženo s přesností na 0,1 g. Společně s optimálním množstvím vody (zde stanoveno na 12,8 %) byla vlákna manuálně vmísena do zeminy (špatně zrněný křemičitý písek – SP). Následně byla směs hutněna do formy o rozměrech 100x100x30 mm a dále zkoušena. Normálová síla byla pro zkoušky stanovena na několika úrovních (50, 100, 200 kPa), horizontální posun byl stanoven na 0,6 mm/min a maximální posun 15 mm.

Přídavek vláken zajistil zvýšení vrcholové smykové pevnosti, zároveň však došlo k většímu poklesu pevnosti po dosažení vrcholu. S vyšší vlhkostí ve vzorku byl efekt vláken nižší než při zkoušení suchého vzorku.

- Wei, Zhao, Meng, Wang a He (2018)

V této studii byla provedena série přímých smykových zkoušek i rotačních smykových zkoušek. Pro vyztužování byl použit písek z Jižního Čínského moře. Tento písek byl velmi specifický svým složením – 68 %  $\text{CaCO}_3$  a 32 %  $(\text{Ca},\text{Mg})\text{CO}_3$ , relativně hrubý a stejnoměrně zrnitý. Zjištěné smykové parametry zeminy byly úhel vnitřního tření  $33,2^\circ$  a koheze 170 kPa. Pro vyztužování byla použita polypropylenová vlákna v délkách 3, 6, 9 a 12 mm, průměru 0,031 mm. Výztuž zaujímal v kompozitu maximálně 1 % suché hmotnosti zeminy. Příprava směsi spočívala v ručním smíchání písku s vlákny a následném umístění do formy. Poté byly vzorky plně saturovány destilovanou vodou, zatíženy svislým napětím a nechaly se konsolidovat (obvykle 24 h). Tělesa pro přímou smykovou zkoušku měla tvar válce o poloměru podstavy 61,8 mm a výšce 20 mm, tělesa pro rotační smykovou zkoušku měla tvar prstence o vnitřním průměru 100 mm a vnějším poloměru 150 mm, výšky také 20 mm. Deformace u obou zkoušek byla kontrolována, u přímé smykové zkoušky omezená 8,8 mm a u rotační smykové zkoušky 16 000 mm. Při zkoušení byly vzorky zatěžovány vertikálním napětím o různých velikostech (200, 300 a 400 kPa).

Zemina vyztužená vlákny vykazala nárůst smykové pevnosti při velkých deformacích ( $>6$  mm). Naopak při malých deformacích ( $<6$  mm) se se zvyšujícím se obsahem vláken smyková pevnost snižovala. Příspěvek vláken je výsledkem ve většině případů přetvoření vláken (prodloužení, prokluz nebo porušení).

#### ***4.3.4 Vliv vyztužení na výsledky smykových zkoušek v předchozích studiích***

V následujících tabulkách (Tab. 4-11 až Tab. 4-13) můžeme vidět vliv vyztužení písku vlákny rákosí. Pro tyto účely jsou použity parametry  $I_{sf}$  a  $I_s$ . Z Tab. 4-11 lze vyčíst, že čím vyšší je podíl vláken ve vzorku, tím vyšší faktor zlepšení smykové pevnosti při porušení. Nejvyšší hodnoty tedy při plošném podílu vyztužení 1,67 %, který odpovídal 22 vláknům.

Tab. 4-11 Vliv množství vláken na parametry zlepšení, písek, materiál: rákosí - zdroj: Gray a Ohashi (1983)

$\chi$ [%]	orientace	průměr [mm]	délka [mm]	$\sigma_l$ [kPa]	$\tau_{fR}$ [kPa]	$\tau_{fU}$ [kPa]	$I_{sf}$
0,25(A)	kolmá	1,75	49	75,5	53,9	45,5	0,18
0,50(A)	kolmá	1,75	49	75,5	65,9	45,5	0,45
1,00(A)	kolmá	1,75	49	75,5	75,8	45,5	0,67
1,67(A)	kolmá	1,75	49	75,5	97,8	45,5	1,15

V Tab. 4-12 je znázorněn vliv orientace vláken vůči předurčené smykové ploše. Nejlepšího zlepšení při porušení dosáhl vzorek s kolmou orientací vláken. Naopak nejnižších hodnot dosáhl vzorek s orientací 120°. Z Tab. 4-13 je ovšem zřejmé, že pokud budeme sledovat vrcholovou smykovou pevnost a tedy parametr  $I_s$ , je situace odlišná. V tomto případě má nejvyšší hodnotu  $I_s$  vzorek s orientací 60° vůči smykové ploše a nejnižší znovu vzorek s úhlem 120°.

Tab. 4-12 Vliv orientace vláken na parametry zlepšení ( $I_{sf}$ ), písek, materiál: rákosí - zdroj: Gray a Ohashi (1983)

$\chi$ [%]	orientace	průměr [mm]	délka [mm]	$\sigma_l$ [kPa]	$\tau_{fR}$ [kPa]	$\tau_{fU}$ [kPa]	$I_{sf}$
0,46(A)	30°	1,75	49	75,5	53,9	50,5	0,07
0,46(A)	60°	1,75	49	75,5	59,9	50,5	0,19
0,46(A)	90°	1,75	49	75,5	69	50,5	0,37
0,46(A)	120°	1,75	49	75,5	50,8	50,5	0,01
0,46(A)	150°	1,75	49	75,5	64,2	50,5	0,27

Tab. 4-13 Vliv orientace vláken na parametry zlepšení ( $I_s$  – vrchol), písek, materiál: rákosí - zdroj: Gray a Ohashi (1983)

$\chi$ [%]	orientace	průměr [mm]	délka [mm]	$\sigma_l$ [kPa]	$\tau_R$ [kPa]	$\tau_{fU}$ [kPa]	$I_s$
0,46(A)	30°	1,75	49	75,5	74,72	50,5	0,48
0,46(A)	60°	1,75	49	75,5	82,4	50,5	0,63
0,46(A)	90°	1,75	49	75,5	78,1	50,5	0,55
0,46(A)	120°	1,75	49	75,5	69	50,5	0,37
0,46(A)	150°	1,75	49	75,5	73,3	50,5	0,45

Pro porovnání jednotlivých materiálů vláken slouží Tab. 4-14. V práci Gray a Ohashi (1983) jsou vlákna rozdělena svými vlastnostmi na dokonale průtažná a dokonale neprůtažná. Nejvyšších hodnot faktoru zlepšení dosáhla měděná vlákna, která jsou v této práci považována za dokonale neprůtažná. Před prováděním zkoušek nebyl povrch vláken nijak dodatečně upravován.

Tab. 4-14 Vliv materiálu vláken na parametry zlepšení ( $I_{sf}$ ), písek - zdroj: Gray a Ohashi (1983)

$\chi$ [%]	materiál	modul pružnosti [GPa]	délka [mm]	$\sigma_1$ [kPa]	$\tau_{fr}$ [kPa]	$\tau_{fu}$ [kPa]	$I_{sf}$
0,23(A)	rákosí	1,5	49	75,5	57	45,5	0,25
0,23(A)	palmyra	16,5	49	75,5	66,1	45,5	0,45
0,25(A)	měď	58,6	49	75,5	75,7	45,5	0,66

Tab. 4-15 Vliv relativní ulehlosti na parametry zlepšení ( $I_{sf}$ ), písek, 0,0 % vlhkosti – zdroj: Eldesouky, Morsy a Mansour (2015)

$\chi$ [%]	$D_r$ [%]	průměr [mm]	délka [mm]	$\sigma_1$ [kPa]	$\tau_{fr}$ [kPa]	$\tau_{fu}$ [kPa]	$I_{sf}$
0,5 (W)	25	0,05	6	50	44,4	36,1	0,23
0,5 (W)	25	0,05	6	100	75	63,9	0,17
0,5 (W)	25	0,05	6	200	150	130,6	0,15
0,5 (W)	60	0,05	6	50	44,4	38,9	0,14
0,5 (W)	60	0,05	6	100	77,8	66,7	0,17
0,5 (W)	60	0,05	6	200	138,9	127,8	0,09
0,5 (W)	90	0,05	6	50	44,4	36,1	0,23
0,5 (W)	90	0,05	6	100	83,3	66,7	0,25
0,5 (W)	90	0,05	6	200	144,4	122,2	0,18

V Tab. 4-15 můžeme vidět vliv relativní ulehlosti na výsledky parametru zlepšení při zkoušení suchého vzorku a různých normálových tlacích. Pro vyjádření množství polypropylenových vláken ve vzorku byl použit hmotnostní podíl, konkrétně 0,5 % suché váhy zeminy. Při nižších normálových napětích byly výsledné parametry zlepšení vyšší než při vyšších napětích. Nejlepších hodnot dosáhly vzorky, které byly zhuťnuty na relativní ulehlost 90 % Proctor standard.

Tab. 4-16 Vliv relativní ulehlosti na parametry zlepšení ( $I_{sf}$ ), písek, 0,0 % vlhkosti – zdroj: Eldesouky, Morsy a Mansour (2015)

$\chi$ [%]	$D_r$ [%]	průměr [mm]	délka [mm]	$\sigma_1$ [kPa]	$\tau_{fr}$ [kPa]	$\tau_{fu}$ [kPa]	$I_{sf}$
1,0 (W)	25	0,05	6	50	50	36,1	0,39
1,0 (W)	25	0,05	6	100	86,1	63,9	0,35
1,0 (W)	25	0,05	6	200	158,3	130,6	0,21
1,0 (W)	60	0,05	6	50	44,4	38,9	0,14
1,0 (W)	60	0,05	6	100	83,3	66,7	0,25
1,0 (W)	60	0,05	6	200	147,2	127,8	0,15
1,0 (W)	90	0,05	6	50	50	36,1	0,39
1,0 (W)	90	0,05	6	100	83,3	66,7	0,25
1,0 (W)	90	0,05	6	200	163,9	122,2	0,34

V Tab. 4-16 vidíme porovnání výsledků parametru zlepšení při různých relativních ulehlostech. Obecně nejlepší výsledky (stejně jako v Tab. 4-15) vykazují vzorky hutněné na relativní ulehlost 90 %.

Tab. 4-17 Vliv relativní ulehlosti na parametry zlepšení ( $I_{sf}$ ), písek, 10,0 % vlhkosti – zdroj: Eldesouky, Morsy a Mansour (2015)

$\chi$ [%]	$D_r$ [%]	průměr [mm]	délka [mm]	$\sigma_1$ [kPa]	$\tau_{fr}$ [kPa]	$\tau_{fu}$ [kPa]	$I_{sf}$
0,5 (W)	25	0,05	6	50	34,2	34,2	0,00
0,5 (W)	25	0,05	6	100	68,4	63,2	0,08
0,5 (W)	25	0,05	6	200	126,3	121,1	0,04
0,5 (W)	60	0,05	6	50	36,8	36,8	0,00
0,5 (W)	60	0,05	6	100	65,8	65,8	0,00
0,5 (W)	60	0,05	6	200	131,6	126,3	0,04
0,5 (W)	90	0,05	6	50	36,8	36,8	0,00
0,5 (W)	90	0,05	6	100	68,4	68,4	0,00
0,5 (W)	90	0,05	6	200	126,3	126,3	0,00

V Tab. 4-17 vidíme vliv relativní ulehlosti na parametr zlepšení při desetiprocentní vlhkosti a podílu vyztužení 0,5 % suché hmotnosti. Je zřejmé, že s přidavkem vlhkosti dochází k menšímu účinku vláken v zemině a tedy parametry zlepšení nejsou tak vysoké. V Tab. 4-18 můžeme pozorovat, že s vyšším podílem vyztuže ve vlhké zemině stoupá hodnota parametru zlepšení, přesto není tak vysoká jako při nulové vlhkosti. Zejména při nízkých normálových napětích je stupeň zlepšení velmi nízký, často nulový. Při vlhkosti 10 % má i samotná nevyztužená zemina horší výsledky než suchá.

Tab. 4-18 Vliv relativní ulehlosti na parametry zlepšení ( $I_{sf}$ ), písek, 10,0 % vlhkosti – zdroj: Eldesouky, Morsy a Mansour (2015)

$\chi$ [%]	$D_r$ [%]	průměr [mm]	délka [mm]	$\sigma_1$ [kPa]	$\tau_{fr}$ [kPa]	$\tau_{fu}$ [kPa]	$I_{sf}$
1,0 (W)	25	0,05	6	50	34,2	34,2	0,00
1,0 (W)	25	0,05	6	100	68,4	63,2	0,08
1,0 (W)	25	0,05	6	200	131,6	121,1	0,09
1,0 (W)	60	0,05	6	50	36,8	36,8	0,00
1,0 (W)	60	0,05	6	100	65,8	65,8	0,00
1,0 (W)	60	0,05	6	200	131,6	126,3	0,04
1,0 (W)	90	0,05	6	50	36,8	36,8	0,00
1,0 (W)	90	0,05	6	100	73,7	68,4	0,08
1,0 (W)	90	0,05	6	200	136,8	128,9	0,06

V Tab. 4-15 až Tab. 4-18 vidíme výsledky translační krabicové smykové zkoušky (Eldesouky, Morsy a Mansour 2015). Lze si všimnout, že výsledky parametru zlepšení



zdaleka nedosahují takových hodnot, jako v Tab. 4-11 až Tab. 4-14 (Gray a Ohashi 1983). Tato skutečnost je způsobena způsobem zkoušení, kdy Gray a Ohashi (1983) používali vlákna s přesně danou orientací vůči předurčené smykové ploše, naopak Eldesouky, Morsy a Mansour (2015) používali náhodnou orientaci vláken. Dalším rozdílem byla délka vláken: Gray a Ohashi (1983) používali vlákna o různé délce od 20 mm do 250 mm, Eldesouky, Morsy a Mansour (2015) používali vlákna o velmi malé délce 6 mm.

## **4.4 Zkouška vytržení vláken**

Zkouška vytržení vláken je typickou zkouškou prováděnou pouze na vyztužené zemině. Nevyztužená zemina se tímto způsobem nezkouší. Výstupem tohoto testu je zjištění velikosti tření mezi vláknem a zrny zeminy. Na základě tohoto parametru je možné s větší přesností kalibrovat materiálový model a sledovat vliv povrchové úpravy vláken na zlepšení zeminy.

### **4.4.1 Obecně o zkoušce vytržení vláken**

Zkouška tohoto typu není v literatuře standardizovaná. Proto je k ní v různých studiích přistupováno různými způsoby. Obecně se dá říci, že je vlákno určité délky (většinou mnohem větší než je délka skutečně použitého vlákna pro vyztužení zeminy) vloženo do zeminy. Na jedné straně je vlákno upevněno, na druhé je vyvozována síla. Vertikálně působí přítlak, který může mít různou velikost. Přítlak způsobí zvýšení tření mezi vláknem a zrny zeminy, proto také na velikosti tohoto napětí záleží.

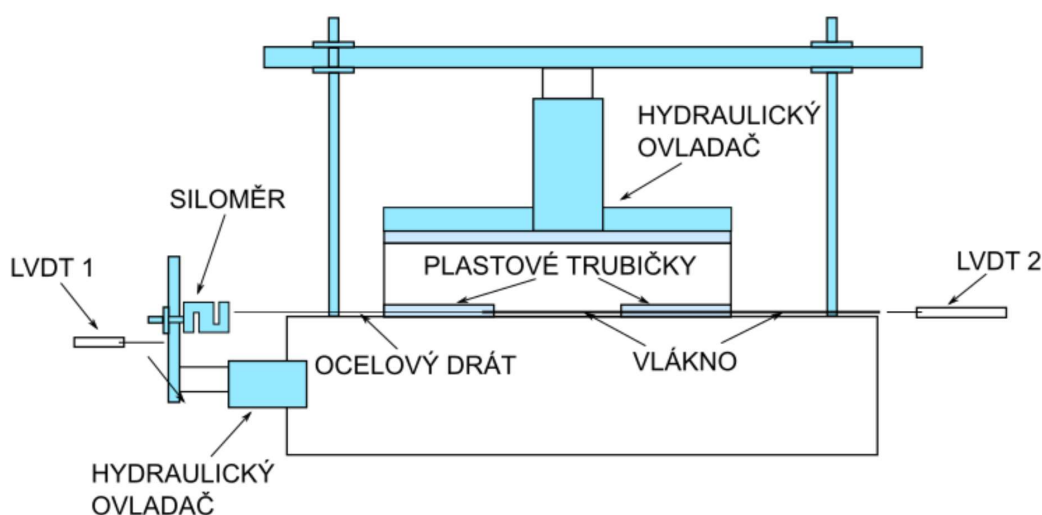
### **4.4.2 Zkouška vytržení vláken v předchozích studiích**

Zkouška vytržení vláken byla prováděna v několika různých studiích. Cílem těchto zkoušek bylo zjistit sílu potřebnou k vytažení vlákna o určitou hodnotu posunu, za předpokladu různých hodnot přítlaků.

- Li a Zornberg (2013)

Pro test vytržení vláken byl použit nově vytvořený přístroj na zkoušení dlouhého polypropylenového vlákna vedoucího skrz zeminu. Zařízení se skládá z jedné horní krabice a jedné dolní krabice. Vertikálně je hydraulicky nanášeno normálové napětí o

různých velikostech (zde konkrétně 72, 143, 214, 288 a 360 kPa). Vlákno bylo protaženo skrz dvě plastové trubičky, zajišťující stále stejnou efektivní dotykovou plochu se zeminou – právě mezi těmito dvěma trubičkami. Horizontální síla je nanášena také hydraulickými ovladači, velikost zatížení měřená siloměry. Horizontální posun vlákna je měřen pomocí tzv. LVDT (linear variable differential transformer), česky lineární pohyblivý diferenční transformátor. Schéma této zkoušky je naznačeno na Obr. 4-9. Výsledky zkoušky vytržení výztuže v této studii jsou uvedeny v Tab. 4-19.



Obr. 4-9 Schéma zkoušky vytržení výztuže

- Michalowski a Čermák (2003)

Michalowski a Čermák (2003) se ve své práci zabývali také vyčíslením interakce mezi vláknem a zrnny zeminy. Pro svá pozorování si vybrali také zkoušku vytržení vláken. Zkoušky byly provedeny v upraveném krabicovém smykovém přístroji. Působení zrn bylo vystaveno vlákno o délce 100 mm, rychlost tahu byla kontrolována 0,2 mm za minutu. Svislé zatížení mělo několik úrovní: konkrétně 100, 200, 400, 600 kPa. Výsledky zkoušky vytržení výztuže v této studii jsou uvedeny v Tab. 4-19.

#### 4.4.3 Vliv typu vlákna na výsledky zkoušky vytržení výztuže v předchozích studiích

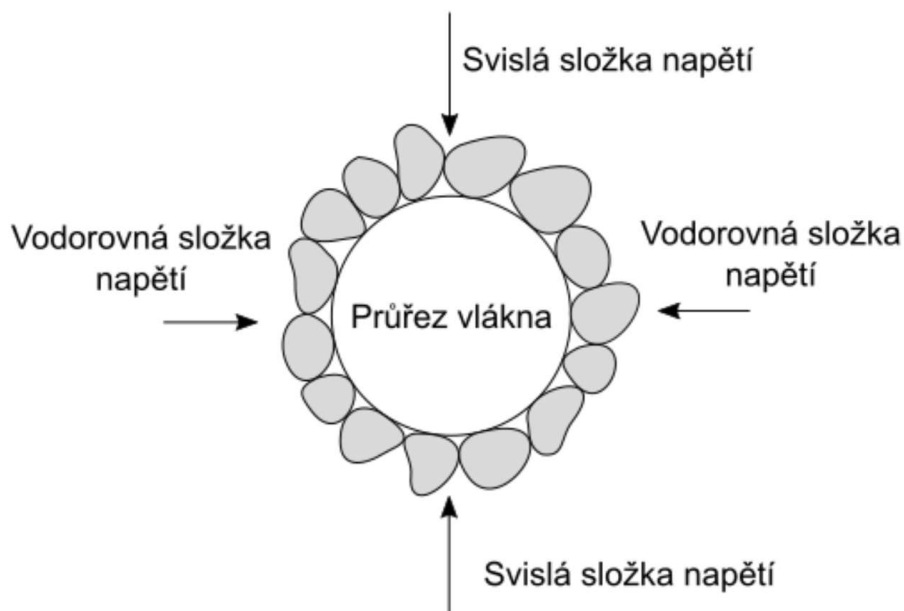
Srovnat výsledky zkoušek vytržení výztuže v různých předchozích studiích není jednoduché. Vliv na výsledky má mnoho různých skutečností. Kritici této metody

zkoušení často namítají, že výsledky těchto zkoušek nejsou relevantní vzhledem k nestejnému rozložení napětí po celé délce vlákna z důvodu ohýbání vlákna a jsou dále zkresleny v blízkosti stěn zkušebního přístroje. V Tab. 4-19 jsou uvedeny příklady různých konfigurací zkoušky vytržení výztuže a dosažených výsledků v různých předchozích studiích. Pro porovnání je použit jednoduchý fyzikální princip tření a porovnávané parametry jsou součinitele smykového tření  $f$ . K vytržení vlákna dochází v momentě, kdy se síla, kterou zatěžujeme rovná třecí síle na povrchu vlákna.

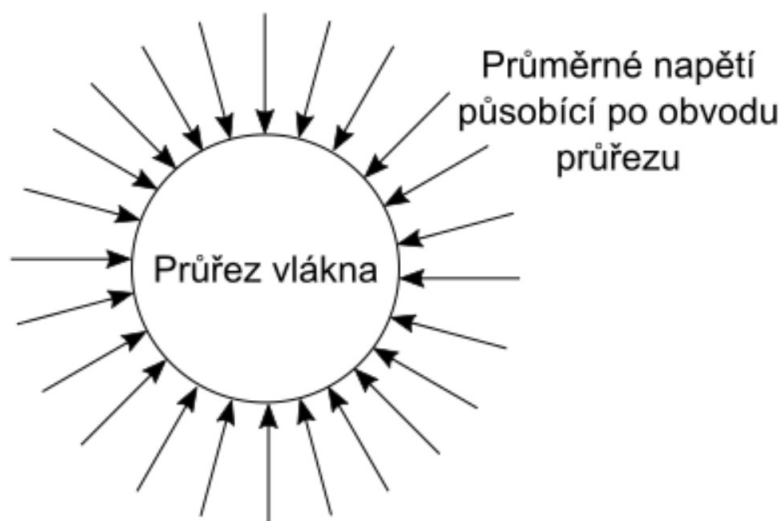
$$F_t = F_n * f \quad (4-40)$$

V rovnici (4-40) vidíme obecný vzorec pro výpočet třecí síly, v němž  $F_t$  je právě třecí síla,  $F_n$  je přitlačná síla a  $f$  součinitel smykového tření mezi povrchem vlákna a zrnny zeminy. V naší úloze známe svislé napětí  $\overline{\sigma_v}$ , které můžeme pomocí součinitele klidového zemního tlaku ( $K_0 = (1 - \sin \varphi)$ ) převést na  $\overline{\sigma_h}$ , tedy horizontální napětí působící na vlákno (viz Obr. 4-10). Zde budeme uvažovat, že napětí působící na plochu povrchu vlákna je stejné jak po celé délce, tak po obvodu (viz Obr. 4-11) průřezu a je rovno  $\overline{\sigma_n}$ , které lze vypočítat pomocí následujícího vztahu (4-41).

$$\overline{\sigma_n} = \frac{(\overline{\sigma_v} + \overline{\sigma_h})}{2} \quad (4-41)$$



*Obr. 4-10 Napětí působící na průřez vlákna*



*Obr. 4-11 Idealizace napětí působící na průřez vlákna - průměrné napětí působící po obvodu průřezu*

Nyní nám už jenom stačí vyčíslit ze známého napětí působícího na plášť vlákna onu přítláčnou sílu, kterou potřebujeme pro výpočet parametru pomocí kterého budeme provádět srovnání.

Pro zjednodušení není uvažován jiný tvar výztuže než kruhový průřez a do dotykové plochy nejsou započítány odchylky v podobě úpravy povrchu vroubky. Je zřejmé, že ve skutečnosti je plocha pláště vlákna mnohem vyšší v případě povrchové úpravy než u naprosto hladkého vlákna. Pokud ovšem zanedbáme zvýšení plochy, na které působí napětí, získáme tím vyšší součinitel smykového tření, což koresponduje s původním předpokladem, že povrchová úprava poskytne vyšší součinitel tření a tím pádem i vyšší odolnost vláken proti vytržení.

V Tab. 4-19 vidíme srovnání třech různých materiálů pro zkoušku vytržení výztuže. Vlákná se lišila jak průměrem (0,3 a 0,74 mm), tak i povrchovou úpravou vláken. Zatímco polyamidová a ocelová vlákna měla povrch hladký, polypropylenová vlákna byla vroubkovaná. U polypropylenových vláken navíc musíme uvažovat další odchylku při porovnávání, tedy skutečnost, že vlákna nebyla dokonalého kruhového průřezu, ale byla to páska, jejíž přesné rozměry nejsou známy (známý údaj je liniová hmotnost 3620 denier). Páska je typ průřezu, který je zploštělý z jedné strany, je tedy diskutabilní jak výpočet styčné plochy se zeminou, tak rozložení svislého napětí a odpovídajícího horizontálního napětí na celý povrch průřezu rovnoměrně.

Tab. 4-19 Srovnání výsledků zkoušek vytržení výztuže v předchozích studiích

vlákno	$K_0$	$\sigma_v$ [kPa]	$\sigma_n$ [kPa]	F [N]	$\varnothing$ [mm]	L [mm]	f [-]	Zdroj:
polypropylen	0,42	72	51,25	4	0,736	152	0,222	Li a Zornberg (2013)
polypropylen	0,42	143	101,79	5,7	0,736	152	0,159	Li a Zornberg (2013)
polypropylen	0,42	214	152,32	6	0,736	152	0,112	Li a Zornberg (2013)
polypropylen	0,42	288	204,99	7,5	0,736	152	0,104	Li a Zornberg (2013)
polypropylen	0,42	360	256,24	8,5	0,736	152	0,094	Li a Zornberg (2013)
polyamid	0,5	100	75,00	-	0,3	100	0,267	Michalowski a Čermák (2003)
polyamid	0,5	200	150,00	-	0,3	100	0,267	Michalowski a Čermák (2003)
polyamid	0,5	400	300,00	-	0,3	100	0,250	Michalowski a Čermák (2003)
polyamid	0,5	600	450,00	-	0,3	100	0,267	Michalowski a Čermák (2003)
ocel	0,5	100	75,00	-	0,3	100	0,400	Michalowski a Čermák (2003)
ocel	0,5	200	150,00	-	0,3	100	0,400	Michalowski a Čermák (2003)
ocel	0,5	400	300,00	-	0,3	100	0,400	Michalowski a Čermák (2003)
ocel	0,5	600	450,00	-	0,3	100	0,378	Michalowski a Čermák (2003)

## 5 MATERIÁLOVÉ MODELÝ ZEMINY VYZTUŽENÉ ROZPTÝLENÝMI VLÁKNY

V minulosti bylo vytvořeno několik materiálových modelů pro zeminy vyztužené rozptýlenou výztuží. Jejich cílem je předvídat chování zeminy na základě známých parametrů – parametry zeminy a výztuže. Předpoklady uvedené v těchto modelech musí být ověřeny praktickým výzkumem. V dnešní době je také možné použít analýzu metodou konečných prvků pro zjištění příspěvku výztuže na chování zeminy.

V této kapitole se seznámíme se šesti modely:

- Waldron (1977)
- Gray a Ohashi (1983) – GO model
- Maher a Gray (1990) – MG model
- Ranjan, Vasan a Charan (1996) – RVC model
- Zornberg (2002)
- Shukla, Sivakugan, Singh (2010) – SSS model

### 5.1 Waldron (1977)

Waldron (1977) ve své práci pracoval se zeminou vyztuženou kořeny. Zároveň se jedná o nejstarší materiálový model pro navrhování zeminy vyztužené vlákny. V této práci je zemina poprvé uvažována jako kompozitní materiál. Kořeny působí jako vlákna s relativně vysokým modulem pružnosti v hmotě s malým modulem pružnosti.

Model je založen na jednoduché rovnováze sil a jeho cílem je vyčíslit příspěvek vláken. V podstatě se jedná o úpravu Mohr-Coulombova vztahu

$$S_R = S + \Delta S = c + \sigma \tan \varphi + \Delta S \quad (5-42)$$

Kde  $S_R$  je smyková pevnost vyztužené zeminy,  $S$  je smyková pevnost nevyztužené zeminy,  $\Delta S$  přírůstek smykové pevnosti v důsledku vyztužení.  $\sigma$  je celkové napětí aplikované na vzorek,  $c$  a  $\varphi$  smykové parametry zeminy.

Model byl podpořen pozorováním na vzorcích vyztužených kořeny. Válcovité zkušební těleso o průměru podstavy 250 mm bylo podrobeno přímé smykové zkoušce. Pružná vlákna stejnoměrného průřezu byla v tomto případě umístěna pouze vertikálně, ve stejné vzdálenosti od sebe. Smyková plocha vznikla horizontálně.

Model dále hodnotí význam kořenů v zemině. Nejen že vyztužují zeminu přímo mechanicky, ale také působí nepřímo odstraňováním vody ze zeminy pomocí transpirace.

## 5.2 Gray a Ohashi (1983) – GO model

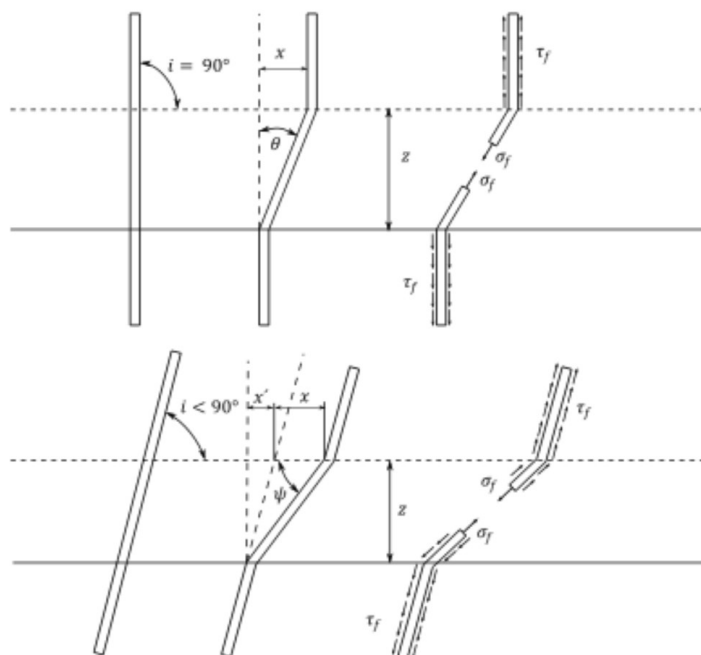
Tento model vychází z Waldronova (1977) modelu a rozšiřuje ho. Přesněji popisuje deformace vyztužené zeminy a dále se věnuje mechanismu porušení v případě vyztužování nesoudržných zemin. Pro validaci GO modelu bylo provedeno množství translačních krabicových smykových zkoušek (viz kapitola 4). V tomto modelu je již zahrnut vliv orientace a rozložení výztuže.

Model se skládá z dlouhých elastických vláken, která jsou rovnoměrně průtažná. Vlákna přispívají ke zlepšení mechanických vlastností tahovým napětím, které se v nich indukují při namáhání. Jedná se o normálovou a tangenciální složku vzhledem k předurčené smykové ploše. Normálová složka svým působením zvyšuje velikost svislého přítlaku působícího na smykovou plochu a tangenciální složka aktivně vzdoruje smyku. Vlákno dále musí být dostatečně tenké, aby se mohlo přetvářet.

Nahoře na Obr. 5-1 vidíme přetvářející se vlákno při kolmé orientaci k smykové ploše (tloušťka smykové plochy  $z$ ). Nejprve je vlákno neporušené, v kolmé orientaci ( $i=90$ ), následně se vlákno deformuje, na tloušťce smykové plochy dochází k odklonu části vlákna o úhel  $\theta$  a horní vetknutá část vlákna se posune oproti původní poloze o vzdálenost  $x$ . Ve vláknech se indukují napětí  $\sigma_f$  a na povrchu vlákna, na styku se zrny zeminy napětí  $\tau_f$ . Nakonec dochází z důvodu příliš velkých deformací k přetržení vlákna.

Dole na Obr. 5-1 vidíme vlákno v jiné než kolmé orientaci (konkrétně pod úhlem  $i < 90$ ). Vlákno se deformuje, odklon vlákna je v tomto případě  $\psi$  a posun oproti původnímu stavu  $x$ .





Obr. 5-1 Vláknó podléhající deformaci při smyku (převzato a upraveno: Gray a Ohashi 1983)

Zvýšení smykové pevnosti  $\Delta S$  na zemině vyztužené vlákny (s kolmou orientací) spočítáme

$$\Delta S = \sigma_R (\sin \theta + \cos \theta \tan \varphi) \quad (5-43)$$

Pro vlákna s jiným než pravým úhlem  $i$  lze vzorec upravit

$$\begin{aligned} \Delta S &= \sigma_R [\sin(90^\circ - \psi) + \cos(90^\circ - \psi) \tan \varphi] \\ &= \sigma_R (\cos \psi + \sin \psi \tan \varphi) \end{aligned} \quad (5-44)$$

Kde úhel  $\psi$  lze vypočítat ze známých velikostí tloušťky smykové plochy  $z$ , odklonu deformovaného vlákna od původní orientace  $x$  a odklonu původní orientace vlákna od kolmé orientace  $x'$ .

$$\psi = \tan^{-1} \left( \frac{z}{x + x'} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{1}{k + \cot i} \right) \quad (5-45)$$

Kde  $k = x/z$  a  $x' = z \cot i$ .  $\sigma_R$  je mobilizované tahové napětí ve vláknech na jednotku plochy zeminy vyztužené vlákny. Lze jej vypočítat

$$\sigma_R = A_r \sigma_f = \left( \frac{A_f}{A} \right) \sigma_f \quad (5-46)$$

kde  $\sigma_f$  je maximální tahové napětí indukované ve vláknech na smykové ploše. Vlákná musí být dostatečně dlouhá, aby bylo zabráněno vytržení vlákna ze zeminy. Také je nutné dosáhnout určité redistribuce napětí po délce vlákna. Zde záleží, zda se rozhodneme pro redistribuci lineární, nebo parabolickou. Pro lineární redistribuci platí vztah

$$\sigma_f = \left( \frac{4E_f \tau_f}{D} \right)^{1/2} [z(\sec \theta - 1)]^{1/2} \quad (5-47)$$

a pro parabolickou redistribuci lze  $\sigma_f$  vypočítat podle vztahu

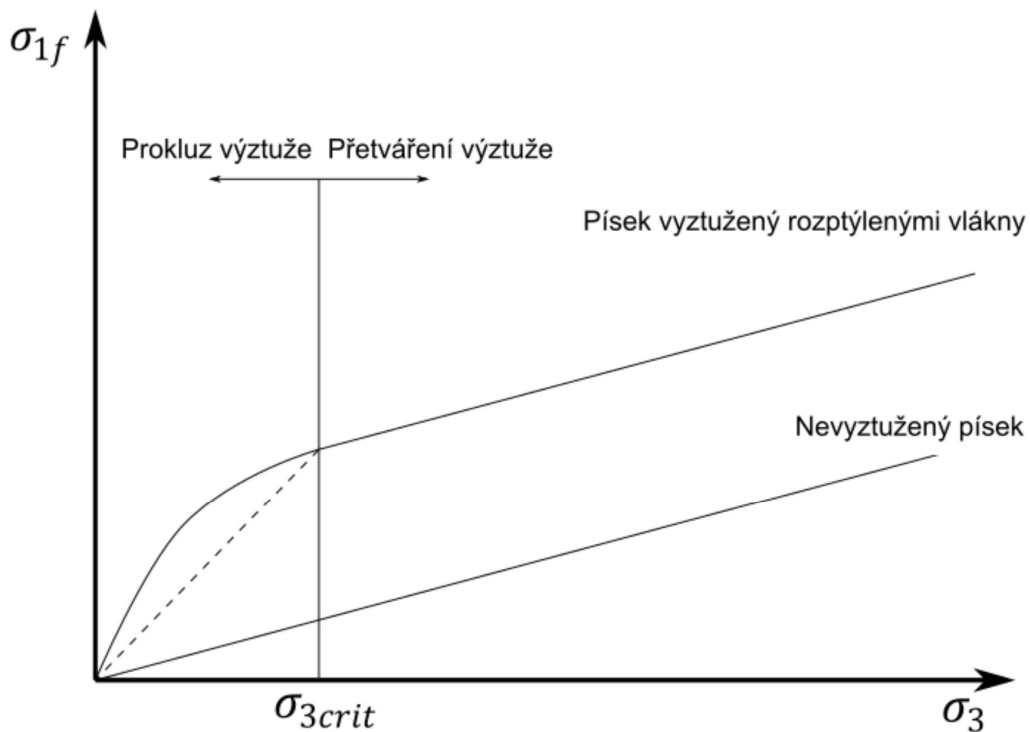
$$\sigma_f = \left( \frac{8E_f \tau_f}{3D} \right)^{1/2} [z(\sec \theta - 1)]^{1/2} \quad (5-48)$$

kde  $E_f$  je modul pružnosti,  $\tau_f$  smykové napětí po délce vlákna,  $D$  průměr vlákna a  $z$  tloušťka smykové plochy.

### 5.3 Maher a Gray (1990) – MG model

Na základě pozorování triaxiálních zkoušek a následné statistické analýze zeminy vyztužené rozptýlenými vlákny vznikl MG model (Maher a Gray 1990). Pro tento model platí několik předpokladů, které je nutné splnit, aby byl uplatnitelný.

- Použitá vlákna musí být stejné délky a průměru a musí být snadno ohebná.
- Kratší polovina délky vlákna na každé straně smykové plochy porušení je rovnoměrně rozložena mezi nulou a polovinou.
- Vlákna jsou rozptýlena tak, že je stejná pravděpodobnost všech úhlů orientace. Z toho plyne, že plocha porušení je orientována stejným způsobem, jako předpoklad z Mohr-Coulombovy podmínky porušení.
- Vlákna v zemině jsou na každé myšlené ploše porušení rozmístěna dle Poissonova rozdělení.
- Pro vyztuženou zeminu má obálka hlavních napětí (graf závislosti  $\sigma_{1f}$  na  $\sigma_3$ : Obr. 5-2) tvar buď zakřiveně-lineární nebo bilineární se zlomem při  $\sigma_3 = \sigma_{3crit}$ .  $\sigma_{3crit}$  se nazývá kritické omezení napětí. V případě, kdy  $\sigma_3 < \sigma_{3crit}$ , deformace nastává prokluzem vláken, naopak při  $\sigma_3 > \sigma_{3crit}$  nastává deformace protažením vláken. Zároveň platí, že nad kritickým omezujícím napětím je obálka hlavních napětí rovnoběžná s Mohr-Coulombovou podmínkou porušení.



Obr. 5-2 Efekt rozptýlené výztuže na tvar obálky hlavních napětí – Maher a Gray (1990)

Přírůstek smykové pevnosti od vyztužení vlákný lze vypočítat dle následujících vztahů:

$$\Delta S = N_s \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) (2a_r \sigma_{3av} \tan \delta) (\sin \theta + \cos \theta \tan \varphi) \eta \quad (5-49)$$

v případě, že  $0 < \sigma_{3av} < \sigma_{3crit}$  nebo také

$$\Delta S = N_s \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) (2a_r \sigma_{3crit} \tan \delta) (\sin \theta + \cos \theta \tan \varphi) \eta \quad (5-50)$$

pro  $\sigma_{3av} > \sigma_{3crit}$ .

V rovnicích (5-40) a (5-41) je nezbytné definovat významy veličin.  $\sigma_{3av}$  je průměrný komorový tlak v triaxiální komoře,  $N_s$  průměrný počet vláken, jimiž prochází smyková plocha,  $a_r$  poměr stran vláken,  $D$  průměr vláken,  $\varphi$  úhel vnitřního tření zeminy,  $\delta$  úhel tření na povrchu vláken a  $\eta$  empiricky stanovený součinitel charakterizující použitou zeminu a vlastnosti vláken.

## 5.4 Ranjan, Vasan a Charan (1996) – RVC model

Ranjan a kol. (1996) představili model založený na statistické a regresní analýze dat získaných z více než 500 triaxiálních zkoušek zeminy vyztužené rozptýlenými vlákny. Definuje, že hlavní napětí při porušení  $\sigma_{1f}$  je funkcí obsahu vláken  $p_f$ , poměru vláken  $a_r$ , součinitele tření na povrchu vláken  $f^*$ , součinitele tření  $f$  a komorového tlaku  $\sigma_3$  (5-51)

$$\sigma_{1f} = f(p_f, a_r, f^*, f, \sigma_3) \quad (5-51)$$

pro výpočet  $f$  a  $f^*$  použijeme následující vztahy:

$$f = \frac{c}{\sigma} + \tan \varphi \quad (5-52)$$

$$f^* = \frac{c_a^a}{\sigma} + \tan \varphi_i \quad (5-53)$$

kde  $\sigma$  je celkové normálové napětí působící na plochu porušení,  $c$  koheze,  $\varphi$  úhel vnitřního tření.  $c_a$  je adheze na povrchu vlákna a  $\varphi_i$  úhel tření na povrchu vlákna (zjištěný ze zkoušky vytržení výztuže).

Obálka porušení zeminy vyztužené vlákny je zakřiveně-lineární se zlomem v bodě  $\sigma_{3cr}$ .  
Pro  $\sigma_3 \leq \sigma_{3cr}$  platí vztah

$$\sigma_{1f} = 12,3(p_f)^{0,4}(a_r)^{0,28}(f^*)^{0,27}(f)^{1,1}(\sigma_3)^{0,68} \quad (5-54)$$

A dále pro  $\sigma_3 \geq \sigma_{3crit}$  platí

$$\sigma_{1f} = 8,78(p_f)^{0,35}(a_r)^{0,26}(f^*)^{0,06}(f)^{0,84}(\sigma_3)^{0,73} \quad (5-55)$$

Bylo vypořádováno, že se zvyšujícím se poměrem stran vláken  $a_r$  se snižuje hodnota  $\sigma_{3crit}$ . Zároveň množství vláken hodnotu  $\sigma_{3crit}$  téměř neovlivní.

## 5.5 Zornberg (2002)

Tento materiálový model zjišťuje příspěvek vláken k smykové pevnosti mobilizací tahového napětí ve vláknech. Zde platí, že celková smyková pevnost zeminy vyztužené vlákny je součtem smykové pevnosti nevyztužené zeminy a příspěvku od výztuže.

Model je popsán v kapitole 2.3 Definice ekvivalentních parametrů vyztužené zeminy.

## 5.6 Shukla, Sivakugan a Sigh (2010) – SSS model

Tento analytický model je určen k předvídání smykového chování zeminy vyztužené vlákny při vysokých omezujících napětích, za předpokladu, že nedojde k vytržení vláken.

Základ odvození SSS modelu vychází z předchozích modelů, kombinací rovnice (5-56) z Waldron (1977) a vztahu (5-57) Gray a Ohashi (1983).

$$S = \sigma \tan \varphi \quad (5-56)$$

$$S_R = S + \Delta S = \sigma_R \cos \psi + (\sigma + \sigma_R \sin \psi) \tan \varphi \quad (5-57)$$

kde  $\sigma$  je celkové normálové napětí působící na smykovou plochu,  $\varphi$  úhel vnitřního tření,  $\Delta S$  přírůstek smykové pevnosti od příspěvku vláken.  $\sigma_R$  je mobilizované tahové napětí ve vláknech na jednotku plochy zeminy vyztužené vlákny, vypočítat lze podle vztahu (5-46). Úhel  $\psi$  lze zjistit pomocí vztahu (5-45).

Předpokladem pro další odvození je použití dostatečně dlouhých vláken, s dostatečným třením na povrchu, aby bylo zabráněno vytržení. Dále uvažujeme rovnoměrnou distribuci napětí po délce vlákna. Za těchto podmínek lze definovat vztah pro výpočet  $\sigma_f$ , tahového napětí ve vláknech

$$\sigma_f \times \left(\frac{\pi}{4} D^2\right) = \left[\left(\frac{L}{2} \times \pi D\right) (\sigma_i)\right] \tan \varphi_i \sin i \quad (5-58)$$

nebo po úpravě také

$$\sigma_f = 2\sigma_i \left(\frac{L}{2}\right) \tan \varphi_i \sin i = 2\sigma_i a_r \tan \varphi_i \sin i \quad (5-59)$$

kde  $\sigma_i$  je normálové napětí na vláknech odkloněné od horizontální roviny o úhel  $i$ ,  $L$  je délka vlákna,  $D$  průměr vlákna. Z toho lze získat poměr stran vlákna  $a_r = L/D$ .  $\varphi_i$  je úhel tření mezi vláknem a zrny zeminy. Vzorec pro výpočet  $\sigma_i$  (podle Jewell a Wroth 1987)

$$\sigma_i = \left[ \frac{1 - \sin \varphi \sin(\varphi - 2i)}{\cos^2 \varphi} \right] \sigma \quad (5-60)$$

Dosazením  $\sigma_i$  dle vztahu (5-60) do vzorce (5-59) získáme

$$\sigma_f = 2\sigma a_r \tan \varphi_i \sin i \left[ \frac{1 - \sin \varphi \sin(\varphi - 2i)}{\cos^2 \varphi} \right] \quad (5-61)$$

Nahrazením (5-46) a (5-59) do rovnice (5-57) dostaneme

$$S_R = c_R + \sigma_{RS} \tan \varphi \quad (5-62)$$

kde

$$c_R = \sigma \left[ 2A_r a_r \tan \varphi_i \sin i \cos \psi \left\{ \frac{1 - \sin \varphi \sin(\varphi - 2i)}{\cos^2 \varphi} \right\} \right] \quad (5-63)$$

a dále

$$\begin{aligned} \sigma_{RS} \\ = \sigma \left[ 1 + 2A_r a_r \tan \varphi_i \sin i \cos \psi \left\{ \frac{1 - \sin \varphi \sin(\varphi - 2i)}{\cos^2 \varphi} \right\} \right] \end{aligned} \quad (5-64)$$

Dalším krokem je porovnat smykovou pevnost nevyztužené zeminy  $S$  a smykovou pevnost zeminy vyztužené rozptýlenými vlákny  $S_R$ . Pro tento účel použijeme veličinu  $SSR$  poměr smykových pevností (anglicky shear strength ratio).

$$SSR = \frac{S_R}{S} \quad (5-65)$$

dosazením  $S$  z (5-56) a  $S_R$  z (5-60) získáme

$$\begin{aligned} SSR = 1 + 2A_r a_r \left[ \frac{1 - \sin \varphi \sin(\varphi - 2i)}{\cos^2 \varphi} \right] \left( \sin \psi \right. \\ \left. + \frac{\cos \psi}{\tan \varphi} \right) \tan \varphi_i \sin i \end{aligned} \quad (5-66)$$

poměr ploch  $A_r$  zjistíme pomocí vzorce

$$\begin{aligned} A_r = \frac{A_f}{A} &= \frac{(A_{f1} + A_{f2} + A_{f3} + \dots + A_{fn})}{(A_{f1} + A_{f2} + A_{f3} + \dots + A_{fn}) + A_{soil}} \times \frac{\Delta L}{\Delta L} \\ &= \frac{V_{sf}}{V_{sf} + V_{soil}} \end{aligned} \quad (5-67)$$

kde  $A_f$  je plocha průřezů vláken na smykové ploše,  $A$  celková velikost smykové plochy,  $\Delta L$  tloušťka elementu měřená kolmo na smykovou plochu. Získáváme vzorec závislosti poměru ploch  $A_r$  na objemu, konkrétně objemu vláken  $V_{sf}$  a objemu zeminy  $V_{soil}$ .

Dále můžeme rovnici (5-67) upravit

$$\frac{V_{sf}}{V_{soil}} = \frac{\left(\frac{A_f}{A}\right)}{1 - \left(\frac{A_f}{A}\right)} = \frac{A_r}{1 - A_r} \quad (5-68)$$

a poté vyjádřit hmotnostní podíl vláken  $p_f$

$$\begin{aligned} p_f = \frac{W_{sf}}{W_{ss}} &= \frac{V_{sf} G_f \gamma_w}{V_{ss} G \gamma_w} = \frac{V_{sf} G_f (1 + e_s)}{V_{soil} G} \\ &= \frac{G_f (1 + e_s)}{G_m} \left( \frac{A_r}{1 - A_r} \right) \end{aligned} \quad (5-69)$$

nebo také závislost  $A_r$  na  $p_f$

$$A_r = \frac{p_f \left[ \frac{G}{G_f (1 + e_s)} \right]}{1 + p_f \left[ \frac{G}{G_f (1 + e_s)} \right]} \quad (5-70)$$

kde  $G_f$  je specifická hmotnost vláken,  $G$  specifická hmotnost zeminy a  $e_s$  číslo pórovitosti.



Následně  $A_r$  nahradíme ve vzorcích (5-63), (5-64) a (5-66) výrazem (5-70).

$$\begin{aligned} \frac{c_R}{\sigma} = 2a_r \tan \varphi_i \sin i \cos \psi & \left[ \frac{p_f \left\{ \frac{G}{G_f(1+e_s)} \right\}}{1 + p_f \left\{ \frac{G}{G_f(1+e_s)} \right\}} \right] \times \\ & \times \left[ \frac{1 - \sin \varphi \sin(\varphi - 2i)}{\cos^2 \varphi} \right] \end{aligned} \quad (5-71)$$

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{RS} - \sigma}{\sigma} = 2a_r \tan \varphi_i \sin i \cos \psi & \left[ \frac{p_f \left\{ \frac{G}{G_f(1+e_s)} \right\}}{1 + p_f \left\{ \frac{G}{G_f(1+e_s)} \right\}} \right] \times \\ & \times \left[ \frac{1 - \sin \varphi \sin(\varphi - 2i)}{\cos^2 \varphi} \right] \end{aligned} \quad (5-72)$$

$$\begin{aligned} SSR = 1 + 2a_r \tan \varphi_i \sin i \left( \sin \psi + \frac{\cos \psi}{\tan \varphi} \right) \times \\ \times \left[ \frac{1 - \sin \varphi \sin(\varphi - 2i)}{\cos^2 \varphi} \right] \times \left[ \frac{p_f \left\{ \frac{G}{G_f(1+e_s)} \right\}}{1 + p_f \left\{ \frac{G}{G_f(1+e_s)} \right\}} \right] \end{aligned} \quad (5-73)$$

Za předpokladu rovnoměrného rozložení poměrného protažení, lze vztah pro jeho výpočet v závislosti na napětí vyjádřit

$$\begin{aligned} \sigma_f = E_f & \left[ \frac{\sqrt{(x + x')^2 + z^2} - \sqrt{x'^2 + z^2}}{\sqrt{x'^2 + z^2}} \right] \\ & = E_f \left( \frac{\sqrt{z^2 + z^2 \cot^2 \psi}}{\sqrt{z^2 + z^2 \cot^2 i}} - 1 \right) \\ & = E_f \left( \frac{\sin i}{\sin \psi} - 1 \right) \end{aligned} \quad (5-74)$$

kde  $E_f$  je Youngův modul pružnosti vláken v tahu. Porovnáním rovnic (5-61) a (5-74) získáme

$$\sin \psi = \frac{\sin i}{1 + 2a_r \tan \varphi_i \sin i \left( \frac{\sigma}{E_f} \right) \left[ \frac{1 - \sin \varphi \sin(\varphi - 2i)}{\cos^2 \varphi} \right]} \quad (5-75)$$

Dosazením známých údajů do rovnic získáme konečné tvary vzorců vystihujících SSS model

$$\begin{aligned} \frac{c_R}{\sigma} = 2\beta_1\beta_2 \left[ \frac{p_f \left\{ \frac{G}{G_f(1+e_s)} \right\}}{1 + p_f \left\{ \frac{G}{G_f(1+e_s)} \right\}} \right] \times \\ \times \left[ \frac{\sqrt{\cos^2 i + 4\beta_1\beta_2 \left( \frac{\sigma}{E_f} \right) \left[ 1 + \beta_1\beta_2 \left( \frac{\sigma}{E_f} \right) \right]}}{1 + 2\beta_1\beta_2 \left( \frac{\sigma}{E_f} \right)} \right] \end{aligned} \quad (5-76)$$

$$\frac{\sigma_{RS} - \sigma}{\sigma} = 2\beta_1\beta_2 \left[ \frac{p_f \left\{ \frac{G}{G_f(1+e_s)} \right\}}{1 + p_f \left\{ \frac{G}{G_f(1+e_s)} \right\}} \right] \left[ \frac{\sin i}{1 + 2\beta_1\beta_2 \left( \frac{\sigma}{E_f} \right)} \right] \quad (5-77)$$

$$\begin{aligned}
SSR = 1 + 2\beta_1\beta_2 & \left[ \frac{p_f \left\{ \frac{G}{G_f(1+e_s)} \right\}}{1 + p_f \left\{ \frac{G}{G_f(1+e_s)} \right\}} \right] \\
& \times \left[ \frac{\sin i}{1 + 2\beta_1\beta_2 \left( \frac{\sigma}{E_f} \right)} \right] \\
& + \left[ \frac{\sqrt{\cos^2 i + 4\beta_1\beta_2 \left( \frac{\sigma}{E_f} \right) \left[ 1 + \beta_1\beta_2 \left( \frac{\sigma}{E_f} \right) \right]}}{\left[ 1 + 2\beta_1\beta_2 \left( \frac{\sigma}{E_f} \right) \right] \tan \varphi} \right]
\end{aligned} \tag{5-78}$$

$$\beta_1 = a_r \tan \varphi_i \sin i \tag{5-79}$$

$$\beta_2 = \frac{1 - \sin \varphi \sin(\varphi - 2i)}{\cos^2 \varphi} \tag{5-80}$$

Predikování hodnot  $SSR$  na základě tohoto modelu, tedy znalosti množství vláken  $p_f$ , poměru stran  $a_r = L/D$ , poměru napětí a modulu pružnosti  $\sigma/E_f$  a specifické hmotnosti vláken  $G_f$  a zeminy  $G$ , je výhodné a nabízí poměrně přesné výsledky v porovnání s reálným chováním zjištěným z laboratorních zkoušek.

## 6 ZÁVĚR

Ačkoliv uplynulo již více než 40 let od doby, kdy byla poprvé popsána zemina vyztužená rozptýlenými vlákny jako nová slibná varianta zlepšování inženýrských vlastností zemin, stále je kam se posouvat. Během tohoto poměrně dlouhého časového období se výzkum problematiky dostal od zkoumání vlivu kořenů vegetace v zemině, přes vyztužování kovovými vlákny až k zatím nejmodernějším vláknům z polymerních materiálů. Bylo provedeno velké množství laboratorních zkoušek (triaxiální smykové zkoušky, krabicové smykové zkoušky) s různými zeminami (zejména písčitými), různými velikostmi (od 6 mm až po 250 mm) a podíly vláken. Vzniklo i několik materiálových modelů popisujících chování takto vyztužené zeminy. Množství odborníků po celém světě uplatňuje své nápady a postřehy za účelem zajištění informací o chování zeminy vyztužené vlákny. Stále však jde o oblast s velkým potenciálem.

Jako vhodný materiál se osvědčil polypropylen, mnoho prací se soustředí právě na něj. Avšak ideální velikost vlákna a jejich podíl v zemině zatím stanoveny nebyly, ve studiích se tyto údaje velmi liší. Jako nejúčinnější se projevila vlákna o délce okolo 25 mm. Při vyztužení polypropylenovými vlákny o délce 25,4 mm, průměru 0,3 mm a obsahem vláken v písku 2,0 % objemově bylo dosaženo nárůstu smykové pevnosti až o 167 % (Michalowski a Čermák 2003). Při vyztužení jílovitého písku polypropylenovými vlákny o délce 24 mm a průměru 0,023 mm došlo ke zvýšení smykové pevnosti až o 431 % (Consoli a kol. 2003). Obvyklé poměry  $L/D$  se pohybují od 50 do 100. Se zmenšující se velikostí zrn zeminy se zmenšuje i průměr vláken a zvyšuje se poměr  $L/D$ .

Další, zatím dostatečně neprobádanou oblastí, je vliv tvaru vláken na účinek vláken v zemině. S novými technologiemi lze i vlákna, která nebudou přímá, průmyslově vyrobit a jejich efekt sledovat v laboratorních podmínkách. Dále také přichází stále častěji na řadu výpočetní technika a s ní matematické modelování. Zeminu vyztuženou vlákny lze tímto způsobem namodelovat, vlákno po vlákně, zrno po zrnu a odhalit tím děje, ke kterým při zatěžování vzorku dochází. Tvar vláken při modelování není v zásadě omezen, tím pádem se nám otevírají další možnosti pokračování výzkumu. Věřme, že jednou se zemina vyztužená vlákny stane běžnou součástí inženýrské praxe a bude se jakožto možný způsob zlepšení navrhovat u mnohých staveb, ať už pozemních či dopravních.

## 7 ZDROJE

AGARWAL, B. D., LAWRENCE, J. B. Analysis and performance of fiber composites. Wiley, New York, 1980.

ARTEAGA, C. B. The shear strength of Ottawa sand mixed with discrete short length plastic fibers. Thesis, Mississippi State University, Mississippi State, Miss, 1989.

BURROUGHS, E. R., THOMAS, B. R. Declining Root Strength in Douglas Fir After Felling as a Factor in Slope Stability. USDA Forest Service Research Paper INT-190, U.S. Department of Agriculture, Juneau, Alaska, 1977.

CONSOLI, N. C., CASAGRANDE, M. D. T., PRIETTO, P. D. M., THOMÉ, A. Plate Load Test on Fiber-Reinforced Soil. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, vol. 129, no. 10, p. 951-955.

CONSOLI, N. C., PRIETTO, P. D. M., ULBRICH, L. A. Influence of fiber and cement addition on behaviour of sandy soil. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, vol. 124, no. 12, p. 1211-1214.

EDIL, T. C., BOSSHER, P. J. Engineering properties of tire chips and soil mixtures. Geotechnical Testing Journal, 1996, vol. 17, no. 4, p. 453-464.

ELDESOUKY, H. M., MORSY, M. M., MANSOUR, M. F. Fiber-reinforced sand strength and dilation characteristics. Ain Shams Engineering Journal, 2015, vol. 122.

ENDO, T., TSURATA, T. The Effect of Tree Roots Upon the Shearing Strength of Soil. Annual Report No. 18 of the Hokkaido Branch, Tokyo Forest Experiment Station, Tokyo, Japan, 1969, p. 168-179.

GRAY, D. H., OHASHI, H. Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, vol. 109, no. 3, p. 335-353.

HOOVER, J. M., MOELLER, D. T., PITT, J. M., WAINAINA, N. W. Performance of randomly oriented fiber-reinforced roadway soils – a laboratory and field investigation.

Iowa DOT Project Report HR-211. Department of Civil Engineering Research Institute, Iowa State University, Ames USA, 1982.

JEWELL, R. A., WROTH, C. P. Direct shear tests on reinforced sand. *Geotechnique*, 1987, vol. 37, no. 1, p. 53-68.

LI, Ch., ZORNBERG, J. G. Mobilization of Reinforcement Forces in Fiber-Reinforced Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, vol. 139, no. 1, p. 107–115.

LI, Ch., ZORNBERG, J. G. Validation of Discrete Framework for Fiber Reinforcement. North American Conference on Geosynthetics, 2003, Winnipeg, Canada, September 28 – October 1 (CD ROM).

LIAUSU, P., JURAN, I. Texsol: Material properties and engineering performance. Transp. Res. Rec. 1474. Transportation Research Board, Washington, D.C., 1995, p. 3-12.

MAHER, M. H., GRAY, D. H. Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1990, vol. 116, no. 11, p. 1661-1677.

MAHER, M. H., HO, Y. C. Behaviour of fiber-reinforced cemented sand under static and cyclic loads. *Geotech Test Journal*, 1993, vol. 16, no. 3, p. 330-338.

MAJI, V. B., SOWMIYAA, V. S., ROBINSON, R. G. A simple Analysis of Reinforced Soil Using Equivalent Approach. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2016, vol. 2.

MICHALOWSKI, R. L., ČERMÁK, J. Strength anisotropy of fiber-reinforced sand. *Computer and Geotechnics*, 2002, vol. 29, p. 279-299.

MICHALOWSKI, R. L., ČERMÁK, J. Triaxial Compression of Sand Reinforced with Fibers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, vol. 129, no. 2, p. 125–136.

MICHALOWSKI, R. L., ZHAO, A. Failure of fiber-reinforced granular soils., Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1996a, vol. 122, no. 3, p. 226-234.

MIČA, L. Mechanika zemin. Brno: VUT Brno, FAST, Ústav geotechniky, 13.2.2018, Přednáška.

MIČA, L. Mechanika zemin. Brno: VUT Brno, FAST, Ústav geotechniky, 4.3.2018, Přednáška.

MIČA, L. Mechanika zemin. Brno: VUT Brno, FAST, Ústav geotechniky, 5.4.2018, Přednáška.

MIRZABABAEI, M., MIRAFATAB, M., MOHAMED, M., MCMAHON, P. Unconfined Compression Strength of Reinforced Clays with Carpet Waste Fibers. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, 2013, vol. 139, no. 3, p. 483-493.

MORADI, M., HAMIDI, A., TAVAKOLI MEHRJARDI, Gh. Shear Strength of Fiber-Reinforced Clayey Sands. Journal of Engineering Geology, 2017, vol. 10, no. 4, p. 3767-3792.

PLÁŠEK, O., SVOBODA, R. Železniční stavby 2. Brno: VUT Brno, FAST, Ústav železničních konstrukcí a staveb, 25.9.2019, Přednáška.

RANJAN, G., VASAN, R. M., CHARAN, H. D. Probabilistic analysis of randomly distributed fibre-reinforced soil. Journal of Geotechnical Engineering ASCE, 1996, vol. 122, no. 6, p. 419-426.

SANTONI, R. L., TINGLE, L. S., WEBSTER, S. L. Engineering properties of sand-fiber mixtures for road construction. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, vol. 127, no. 3, p. 258-268.

SHUKLA, S. K. Fundamentals of Fibre-Reinforced Soil Engineering. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2017.

SHUKLA, S.K., SIVAKUGAN, N., SINGH, A. K. Analytical model for fiber-reinforced granular soils under high confining stresses. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, vol. 22, no. 9, p. 935-942.

STAUFFER, S. D., HOLTZ, R. D. Stress-strain and strength behavior of sample fiber and continuous filament-reinforced sand. *Transp. Res. Rec. 1474*, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1995, p. 82-95.

UDDIN, S., MARRI, A., WANATOWSKI, D., REDDISH, D. J. Behaviour of cemented sand reinforced with polypropylene fibres. Conference: 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, At Hong Kong, China, May 2011.

VARAUS, M. Pozemní komunikace 1, Brno: VUT Brno, FAST, Ústav pozemních komunikací, 1.10.2018, Přednáška.

STEHLÍK, D. Pozemní komunikace 1, Brno: VUT Brno, FAST, Ústav pozemních komunikací, 8.10.2018, Přednáška.

WALDRON, L. J. Shear Resistance of Root-Permeated Homogeneous and Stratified Soil. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1977, vol. 41, p. 843-849.

WEI, H., ZHAO, T., MENG, Q., WANG, X., HE, J. Experimental evaluations on the shear behavior of fiber-reinforced calcareous sands. *International Journal of Geomechanics*, 2018, vol. 18.

YOUWEI, S., BERGADO, D. T. Strength and deformation characteristics of Shredded rubber tire-sand mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, vol. 40, p. 254-264.

ZORNBERG, J. G. Discrete framework for limit equilibrium analysis of fibre-reinforced soil. *Geotechnique*, 2002, vol. 52, no. 8, p. 593–604.



## 8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1-1 Svah zpevněný kořeny stromů .....	13
Obr. 1-2 Kořeny vegetace přítomné v zemině.....	13
Obr. 2-1 Fáze nevyztužené zeminy .....	15
Obr. 2-2 Fáze vyztužené zeminy .....	16
Obr. 2-3 Ukázka možného průběhu smykové pevnosti v závislosti na přetvoření .....	17
Obr. 2-4 Graf příspěvku rozptýlené výztuže .....	18
Obr. 3-1 Rozměry typického vlákna.....	28
Obr. 3-2 Schéma pro porovnání objemového a hmotnostního podílu.....	34
Obr. 3-3 Vliv množství vláken na chování vyztužené zeminy.....	37
Obr. 4-1 Triaxiální zkoušení vzorku.....	41
Obr. 4-2 Nepravý triaxiální způsob zkoušení .....	42
Obr. 4-3 Schéma triaxiální komory .....	42
Obr. 4-4 Znázornění křivek zrnitosti zeminy použité pro triaxiální zkoušky (Michalowski a Čermák 2003) .....	46
Obr. 4-5 Návrh drátěné pomůcky pro zajištění správné orientace vláken ve vzorku (Michalowski a Čermák 2003) .....	46
Obr. 4-6 Vzorek umístěný do smykového krabicového přístroje při smýkání.....	57
Obr. 4-7 Vzorek v smykovém krabicovém přístroji po vzniku smykové plochy.....	57
Obr. 4-8 Schéma kruhového smykového přístroje .....	58
Obr. 4-9 Schéma zkoušky vytržení výztuže .....	66

Obr. 4-10 Napětí působící na průřez vlákna.....	68
Obr. 4-11 Idealizace napětí působící na průřez vlákna - průměrné napětí působící po obvodu průřezu.....	68
Obr. 5-1 Vláknó podléhající deformaci při smyku (převzato a upraveno: Gray a Ohashi 1983).....	73
Obr. 5-2 Efekt rozptýlené výztuže na tvar obálky hlavních napětí – Maher a Gray (1990) .....	75

## 9 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Souhrn predikovaných ekvivalentních smykových parametrů (převzato z Zornberg 2002).....	22
Tab. 2-2 Pokračování Tab. 2-1 .....	22
Tab. 3-1 Porovnání odolnosti vybraných polymerních materiálů (převzato z Shukla S. K. – Fundamentals of Fibre-Reinforced Soil Engineering).....	25
Tab. 3-2 Charakteristické vlastnosti polymerních materiálů (převzato z Shukla S. K. – Fundamentals of Fibre-Reinforced Soil Engineering).....	26
Tab. 3-3 Příklady některých použitých kombinací materiálů a geometrie.....	31
Tab. 3-4 Pokračování Tab. 3-3 .....	32
Tab. 4-1 Parametry zeminy pro triaxiální zkoušku (Li a Zornberg 2013) .....	45
Tab. 4-2 Srovnání parametrů triaxiálních smykových zkoušek v předchozích studiích	51
Tab. 4-3 Vliv množství výztuže na parametry zlepšení, polymerní vlákna .....	51
Tab. 4-4 Vliv komorového tlaku na parametry zlepšení, polymerní vlákna .....	52
Tab. 4-5 Vliv množství výztuže na parametry zlepšení, polymerní vlákna .....	53
Tab. 4-6 Vliv orientace vláken na parametry zlepšení, jemný písek, materiál: polyamid - zdroj: Michalowski a Čermák (2002).....	54
Tab. 4-7 Vliv orientace vláken na parametry zlepšení, jemný písek, materiál: ocel - zdroj: Michalowski a Čermák (2002) .....	54
Tab. 4-8 Vliv orientace vláken na parametry zlepšení, hrubý písek, materiál: polyamid - zdroj: Michalowski a Čermák (2002).....	54
Tab. 4-9 Vliv orientace vláken na parametry zlepšení, hrubý písek, materiál: ocel - zdroj: Michalowski a Čermák (2002) .....	55

Tab. 4-10 Vliv komorového tlaku na výsledky parametrů zlepšení, jílovitý písek – Consoli, Casagrande, Prietto a Thomé (2003).....	55
Tab. 4-11 Vliv množství vláken na parametry zlepšení, písek, materiál: rákosí - zdroj: Gray a Ohashi (1983) .....	62
Tab. 4-12 Vliv orientace vláken na parametry zlepšení ( $I_{sf}$ ), písek, materiál: rákosí - zdroj: Gray a Ohashi (1983) .....	62
Tab. 4-13 Vliv orientace vláken na parametry zlepšení ( $I_s$ – vrchol), písek, materiál: rákosí - zdroj: Gray a Ohashi (1983).....	62
Tab. 4-14 Vliv materiálu vláken na parametry zlepšení ( $I_{sf}$ ), písek - zdroj: Gray a Ohashi (1983) .....	63
Tab. 4-15 Vliv relativní ulehlosti na parametry zlepšení ( $I_{sf}$ ), písek, 0,0 % vlhkosti – zdroj: Eldesouky, Morsy a Mansour (2015) .....	63
Tab. 4-16 Vliv relativní ulehlosti na parametry zlepšení ( $I_{sf}$ ), písek, 0,0 % vlhkosti – zdroj: Eldesouky, Morsy a Mansour (2015) .....	63
Tab. 4-17 Vliv relativní ulehlosti na parametry zlepšení ( $I_{sf}$ ), písek, 10,0 % vlhkosti – zdroj: Eldesouky, Morsy a Mansour (2015).....	64
Tab. 4-18 Vliv relativní ulehlosti na parametry zlepšení ( $I_{sf}$ ), písek, 10,0 % vlhkosti – zdroj: Eldesouky, Morsy a Mansour (2015).....	64
Tab. 4-19 Srovnání výsledků zkoušek vytržení výztuže v předchozích studiích.....	70